



**Rômulo Rodrigues de Moraes Bezerra**

**DESENVOLVIMENTO DE FILTROS ESPACIAIS FSS COM  
ELEMENTOS POLARES PARA APLICAÇÕES *INDOOR*  
DE REDES LOCAIS SEM FIO**

João Pessoa - PB

Março de 2019



**Rômulo Rodrigues de Moraes Bezerra**

**DESENVOLVIMENTO DE FILTROS ESPACIAIS FSS COM  
ELEMENTOS POLARES PARA APLICAÇÕES *INDOOR*  
DE REDES LOCAIS SEM FIO**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado.

Orientador: Paulo Henrique da Fonseca Silva, Prof. Dr.

João Pessoa - PB, Março de 2019

©Rômulo Rodrigues de Moraes Bezerra - romulorodrigue@gmail.com.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP  
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *Campus* João Pessoa

B5741c Bezerra, Rômulo Rodrigues de Moraes.

Desenvolvimento de filtros espaciais FSS com elementos polares para aplicações indoor de redes locais sem fio / Rômulo Rodrigues de Moraes Bezerra. – 2019.

73 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.

Orientador: Prof.<sup>º</sup> Paulo Henrique da Fonseca Silva

1. Superfícies Seletivas em Frequência - FSS. 2. Filtros Espaciais. 3. Transformações Polares. 4. Wireless Building. 5. Redes Locais Sem Fio. I. Título.

CDU 621.3.018.4


Ivanise Andrade M. de Almeida  
Bibliotecária-Documentalista  
CRB-15/0096

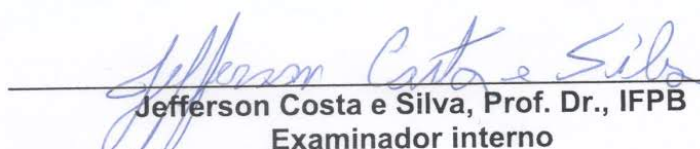
# **DESENVOLVIMENTO DE FILTROS ESPACIAIS FSS COM ELEMENTOS POLARES PARA APLICAÇÕES INDOOR DE REDES LOCAIS SEM FIO**

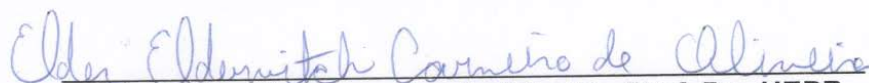
Dissertação de Mestrado submetida  
ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica do Instituto  
Federal da Paraíba, como requisito  
necessário à obtenção do grau de  
Mestre em Ciências no Domínio da  
Engenharia Elétrica.

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 27 / 03 / 2019

## **BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
**Paulo Henrique da Fonseca Silva, Prof. Dr., IFPB**  
**Orientador**

  
\_\_\_\_\_  
**Jefferson Costa e Silva, Prof. Dr., IFPB**  
**Examinador interno**

  
\_\_\_\_\_  
**Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira, Prof. Dr., UEPB**  
**Examinador externo**

João Pessoa – PB  
Março de 2019



*À todos que acreditaram na realização deste trabalho,  
em especial a minha família, namorada e amigos.*

*Dedico.*

# Agradecimentos

À Deus toda honra e toda glória, agora e para sempre.

Agradeço à minha família, em especial à minha mãe Rizioneide, que diariamente busca fornecer o melhor.

À minha namorada Gabriely Lucena, pelo amor, companheirismo e incentivo.

Ao professor Paulo Henrique da Fonseca Silva, pela orientação, motivação, paciência e ensinamentos durante o curso.

Ao grupo GEMCA (Grupo de Eletromagnetismo e Matemática Computacional Aplicada), em especial ao professor Elder Eldervitch pela oportunidade de aprendizado ofertada desde a graduação e ao longo dessa jornada.

Aos demais professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do IFPB que contribuíram e me incentivaram, de forma direta ou indireta, na minha construção pessoal e profissional e para a consolidação deste trabalho.

Ao IFPB - Campus João Pessoa, pelo incentivo financeiro ofertado através da bolsa de mestrado.

*“Não temas, porque eu sou contigo;  
não te assombres, porque eu sou teu Deus;  
eu te fortaleço, e te ajudo, e te sustento  
com a destra da minha justiça.  
(Bíblia Sagrada, Isaías 41, 10)*

## Resumo

Nesta dissertação descreve-se o desenvolvimento de filtros espaciais do tipo rejeita-faixas através do uso de superfícies seletivas em frequência (FSS) com elementos polares e resposta em uma ou duas bandas de operação. Os protótipos propostos foram desenvolvidos para aplicação em ambientes *indoor* de redes locais sem fio, rejeitando os sinais nas faixas de 2,4 - 2,5 GHz (IEEE 802.11b) e 5,0 - 6,0 GHz (IEEE 802.11a). Como base no conceito conhecido como "*wireless building*" os filtros espaciais FSS podem ser usados para modificar os ambientes de propagação *indoor* de uma edificação com diferentes finalidades, tais como: aumentar a cobertura *indoor*, reduzir interferências, assegurar segurança da informação. Os filtros espaciais FSS foram projetados com arranjos periódicos de elementos do tipo espira, definidos através de equações polares e foram considerados dois tipos de substratos dielétricos: fibra de vidro (FR-4) e vidro. As simulações foram realizadas com o *software* comercial ANSYS Designer™. A metodologia de projeto adotada foi validada através da caracterização experimental dos protótipos construídos com o uso de um analisador de redes vetorial (*Agilent Technologies*, modelo N5230A). As superfícies seletivas em frequência com substrato de vidro apresentaram excelentes propriedades de rejeição nas bandas de operação. A diferença percentual da comparação entre os resultados simulado e medido da frequência de ressonância dos protótipos com substrato de vidro foi menor que 0,5% e com excelente estabilidade da resposta em frequência para ângulos de incidência até 50 graus.

**Palavras-chaves:** Filtros espaciais, superfícies seletivas em frequência, elementos polares, *wireless building*, redes locais sem fio.

## **Abstract**

This dissertation describes the development of bandstop spatial filters through the use of frequency selective surfaces (FSS) with polar elements and frequency response in single band or dual band. Proposed prototypes were developed for application in indoor wireless environments, rejecting the signals in the 2.4 - 2.5 GHz (IEEE 802.11b) and 5.0 - 6.0 GHz (IEEE 802.11a). As a basis for the concept known as "wireless building", FSS spatial filters can be used to modify the indoor propagation environments of a building with different purposes, such as: reduce interference, and ensure information security. The FSS spatial filters were designed with periodic array of loop elements defined by polar equations and were considered two types of dielectric substrates: fiberglass (FR-4) and glass. The simulations were performed with the ANSYS Designer™ commercial software. The adopted design methodology was validated through the experimental characterization of the built prototypes constructed with the use of a vector network analyzer (Agilent Technologies, model N5230A). Frequency selective surfaces with glass substrate showed excellent rejection properties in the operating bands. The percentage error in resonance frequency simulated and measured results for the glass substrate prototypes was less than 0.5% and with excellent stability of the frequency response at angles of incidence up to 50 degrees.

**Keywords:** Spatial filters, frequency selective surfaces, polar elements, wireless building, wireless local area networks.

## Lista de Figuras

1	Papel de parede seletivo em frequência [8]. . . . .	23
2	Ilustração de uma janela seletiva em frequência [4]. . . . .	24
3	Janela revestida com aberturas hexagonais [4]. . . . .	24
4	Ilustração de aumento de cobertura <i>indoor</i> entre dois corredores com o uso de filtro espacial FSS rejeita-faixas. . . . .	26
5	Ilustração de elementos do tipo abertura e <i>patch</i> . . . . .	28
6	Tipos de elementos de uma FSS [26] . . . . .	30
7	Tipos de elementos de uma FSS: (a) Grupo 1: N-polos conectados pelo centro; (b) Grupo 2: Espiras; (c) Grupo 3: Interior sólido; (d) Grupo 4: Combinações. . . . .	31
8	Arranjo de medição de uma FSS com material absorvedor [7]. . . . .	34
9	Arranjo de medição de uma FSS com lentes Gaussianas [32]. . . . .	35
10	Aplicação de FSS como anteparo na porta do forno de micro-ondas [37]	36
11	Sistema de coordenadas polares. . . . .	37
12	Gráficos em coordenadas polares de rosáceas: (a) a partir da equação (1); (b) a partir da equação (2). . . . .	38
13	Efeito da variação do parâmetro $n$ na equação polar da rosácea [42]. . .	38
14	Exemplos de elementos de FSS obtidos a partir da superfórmula de Gielis [7] . . . . .	39
15	Diagrama em blocos: metodologia adotada para o desenvolvimento de protótipos de filtros espaciais FSS com elementos polares. . . . .	40
16	Variação da espessura das espiras polares. . . . .	41
17	Célula unitária com duas espiras circulares. . . . .	41
18	Célula unitária da FSS-1 duas espiras polares côncavas. . . . .	42

19	Elemento de FSS gerado no MATLAB® : (a) espira maior; (b) espira menor; (c) elemento composto com duas espiras polares - côncava e convexa. . . . .	43
20	Elementos de FSS <i>patch</i> com abertura em forma de espira polar: FSS-3 com <i>patch</i> convexo e abertura em forma de espira côncava. . . . .	43
21	Célula unitária da FSS-5 com espiras polares cruzadas – côncava e convexa. . . . .	44
22	Resposta em frequência para a FSS com duas espiras circulares, resultado simulado $ S_{21} $ em dB. . . . .	46
23	Variação das frequências de ressonância de uma FSS com duas espiras circulares em função da espessura das espiras. . . . .	47
24	Arranjo de medição para FSS-3 com <i>patch</i> convexo e abertura em forma de espira côncava. . . . .	48
25	Protótipo da FSS-1 com duas espiras polares côncavas: (a) célula unitária; (b) FSS fabricada. . . . .	49
26	Comparação das respostas em frequência para FSS-1 com duas espiras polares côncavas, resultados simulado e medido, $ S_{21} $ em dB. . . . .	50
27	Resultados medidos para FSS-1 com duas espiras polares côncavas, em função do ângulo de incidência. . . . .	51
28	Protótipo da FSS-2 com duas espiras polares - côncava e convexa: (a) célula unitária; (b) FSS fabricada. . . . .	51
29	Comparação das respostas em frequência para FSS-2 com duas espiras polares - côncava e convexa, resultados simulado e medido, $ S_{21} $ em dB. . . . .	52
30	Comparação entre o elemento polar projetado e fabricado para FSS-2 com duas espiras polares - côncava e convexa. . . . .	52
31	Resultados medidos para FSS-2 com duas espiras polares - côncava e convexa, em função do ângulo de incidência. . . . .	53

32	Protótipo da FSS-3 com <i>patch</i> convexo e abertura em forma de espira côncava: (a) célula unitária; (b) FSS fabricada. . . . .	54
33	Comparação das respostas em frequência para FSS-3 com <i>patch</i> convexo e abertura em forma de espira côncava, resultados simulado e medido, $ S_{21} $ em dB. . . . .	55
34	Resultados medidos para FSS-3 com <i>patch</i> convexo e abertura em forma de espira côncava, em função do ângulo de incidência. . . . .	56
35	Permissividade elétrica relativa medida para o substrato de vidro. . . . .	57
36	Tangente de perdas medida para o substrato de vidro. . . . .	57
37	Comparação entre os resultados simulado e medido do protótipo inicial para FSS-4 com duas espiras polares - côncava e convexa. . . . .	58
38	Laminado adesivo de cobre. . . . .	59
39	Protótipo da FSS-4 com duas espiras polares - côncava e convexa: (a) célula unitária; (b) FSS fabricada. . . . .	60
40	Comparação das respostas em frequência para FSS-4 com duas espiras polares - côncava e convexa, resultados simulado e medido, $ S_{21} $ em dB. . . . .	60
41	Resultados medidos para FSS-4 com duas espiras polares - côncava e convexa, em função do ângulo de incidência. . . . .	61
42	Célula unitária do protótipo inicial da FSS-5. . . . .	62
43	Resposta em frequência do protótipo inicial para FSS-5, resultado simulado, $ S_{21} $ em dB. . . . .	63
44	Protótipo da FSS-5 com espiras polares cruzadas – côncava e convexa: (a) célula unitária; (b) FSS fabricada. . . . .	63
45	Arranjo para medição da FSS-5 com espiras polares cruzadas – côncava e convexa. . . . .	64
46	Comparação das respostas em frequência para FSS-5 com espiras polares cruzadas – côncava e convexa, resultados simulado e medido, $ S_{21} $ em dB. . . . .	65



47	Resultados medidos para FSS-5 com espiras polares cruzadas – cônica e convexa, em função do ângulo de incidência. . . . .	66
----	---	----

## Lista de Tabelas

1	Valores dos parâmetros geométricos dos protótipos de filtros espaciais FSS fabricados com elementos polares gerados a partir da superfórmula de Gielis. . . . .	44
2	FSS com espiras circulares: valores numéricos obtidos. . . . .	46
3	FSS com espiras circulares: valores numéricos obtidos em relação a espessura da espira. . . . .	47
4	FSS-1 com duas espiras polares côncavas: comparação entre os valores numéricos obtidos. . . . .	50
5	FSS-2 com duas espiras polares - côncava e convexa: comparação entre os valores numéricos obtidos. . . . .	53
6	FSS-3 com <i>patch</i> convexo e abertura em forma de espira côncava: comparação entre os valores numéricos obtidos. . . . .	56
7	FSS-4 protótipo inicial com duas espiras polares - côncava e convexa: comparação entre os valores numéricos obtidos. . . . .	59
8	FSS-4 com duas espiras polares - côncava e convexa: comparação entre os valores numéricos obtidos. . . . .	62
9	FSS-5 com espiras polares cruzadas – côncava e convexa: comparação entre os valores numéricos obtidos. . . . .	65

## Lista de Siglas

CAD	<i>Computer-Aided Design</i> – Projeto auxiliado por computador
CCK	<i>Complementary Code Keying</i> – Chaveamento Complementar de Código
DXF	<i>Drawing Exchange Format</i> – Arquivo de Intercâmbio para Modelos de CAD
FDTD	<i>Finite-Difference Time-Domain</i> – Diferenças Finitas no Domínio do Tempo
FEM	<i>Finite-Element Method</i> – Método dos Elementos Finitos
FSS	<i>Frequency Selective Surfaces</i> – Superfícies Seletivas em Frequência
GPS	<i>Global Positioning System</i> – Sistema de Posicionamento Global
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> – Sistema Global para Comunicações Móveis
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i> – Médico, Industrial e Científico
MCE	Método Circuito Equivalente
MoM	<i>Method of Moments</i> – Método dos Momentos
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> – Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> - Multiplexação de Divisão de Frequência Ortogonal
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i> - Sistema Universal de Telecomunicações Móveis
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> – Rede Local Sem Fio

## Lista de Símbolos

$a$	Semieixo maior
$A$	Raio da rosácea
$b$	Semieixo menor
$BW$	Largura de banda
$f_r$	Frequência de ressonância
$h$	Espessura de substrato dielétrico
$O$	Origem do sistema de coordenadas polares
$m$	Número de pétalas da superfórmula de Gielis
$n$	Número de pétalas da rosácea
$n_1$	Expoente 1 da superfórmula de Gielis
$n_2$	Expoente 2 da superfórmula de Gielis
$n_3$	Expoente 3 da superfórmula de Gielis
$p$	Periodicidade da célula unitária
$r$	Coordenada radial do sistema de coordenadas polares
$S_{21}$	Coeficiente de transmissão
$\text{tg}(\delta)$	Tangente de perdas
$w$	Espessura de uma espira condutora
$\epsilon_r$	Permissividade elétrica relativa
$\lambda$	Comprimento de onda
$\theta$	Coordenada angular do sistema de coordenadas polares

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>19</b>
1.1	Organização do texto . . . . .	21
<b>2</b>	<b><i>Wireless Building</i> - Conceito e Aplicações</b>	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>Superfícies Seletivas em Frequência</b>	<b>27</b>
3.1	Estruturas e características . . . . .	28
3.2	Elementos de FSS . . . . .	29
3.3	Métodos de análise . . . . .	32
3.4	Técnicas de medição . . . . .	34
3.5	Aplicações . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Transformações Polares</b>	<b>37</b>
4.1	Coordenadas polares . . . . .	37
4.2	Superfórmula de Gielis . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Metodologia</b>	<b>40</b>
5.1	FSS Circular . . . . .	41
5.2	FSS com elementos do tipo espira polar . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>45</b>
6.1	Resultados da superfície seletiva em frequência com espiras circular . .	45
6.2	Resultados para os filtros espaciais FSS com elementos polares . . . .	47
6.2.1	FSS-1 com duas espiras polares côncavas . . . . .	49
6.2.2	FSS-2 com duas espiras polares - côncava e convexa . . . . .	51
6.2.3	FSS-3 com <i>patch</i> convexo e abertura em forma de espira côncava	54

6.2.4	FSS-4 com duas espiras polares - côncava e convexa . . . . .	56
6.2.5	FSS-5 com espiras polares cruzadas – côncava e convexa . . .	62
<b>7</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>67</b>
7.1	Proposta para trabalhos futuros . . . . .	68
	<b>Referências</b>	<b>69</b>

# 1 Introdução

A utilização de redes locais sem fio (*Wireless Local Area Network* – WLAN) tem aumentado significativamente em residências, escritórios e edifícios devido à facilidade de uso e à praticidade de instalação. As tecnologias de comunicação sem fio abrangem diversas faixas de frequências com normas específicas para regularem seu uso. As normas da tecnologia WLAN foram desenvolvidas nos anos de 1980 pelo grupo do IEEE 802, nas faixas de frequências indicadas para as bandas ISM (*Industrial Scientific and Medical* – Médico, Industrial e Científico), 900 MHz (902 – 928 MHz), 2,4 GHz (2,4 – 2,835 GHz), e 5 GHz, (5,15 – 5,35 GHz e 5725 – 5875 MHz).

Contudo, a segurança da informação é um ponto fraco das redes sem fio, pois o sinal propaga-se pelo ar em todas as direções e pode ser captado a distâncias de centenas de metros tornando-as vulneráveis à interceptação [1]. Neste contexto, projetos de edificações que apresentam características de filtragem de sinais WLAN, correspondente às faixas de frequências de 2,4 GHz e 5,8 GHz têm sido alvo de pesquisas de estudos abordados por grupos de pesquisa, engenheiros, e empresas ao redor do mundo. O crescimento e aceitação da tecnologia WLAN propicia o surgimento de novos métodos que buscam atenuar as deficiências de segurança. Uma das técnicas que têm se destacado nesse contexto é conhecida por “*wireless building*”, isto é, consiste em modificar fisicamente o ambiente de propagação *indoor*, por meio de alterações na estrutura e materiais das edificações, de modo que elas exibam propriedades eletromagnéticas específicas [2]. Nesta técnica, a instalação dos sistemas de comunicação é prevista já na fase de projeto de uma edificação, coexistindo com as outras instalações tais como: elétrica, hidráulica, de incêndio, etc.

É possível prevenir a propagação *indoor* para frequências específicas, por exemplo 2,4 GHz e 5,8 GHz, com o uso de filtros espaciais FSS do tipo rejeita-faixas que são abordados nesta dissertação. Esses filtros espaciais podem ser inseridos em paredes e/ou janelas de um edifício para funcionar, por exemplo, como blindagem eletromagnética a fim de proteger ambientes contra interferências indesejadas [3–6]. Neste tipo de aplicação, é possível a utilização de FSS em diversos ambientes fechados como hospitais, escolas, penitenciárias, para bloqueio de sinais. Em outro tipo de aplicação, os filtros espaciais FSS rejeita-faixas funcionam como refletores

para aumentar a cobertura *indoor* de uma rede sem fio. Por exemplo, os sinais desejados podem ser redirecionados por refletores eletromagnéticos instalados no final de corredores.

As superfícies seletivas em frequência possuem formas, tamanhos e materiais de composição diferentes dependendo de sua aplicação, faixa de frequência, e local de uso. Diversas geometrias são utilizadas, dentre elas podem ser destacadas: as Euclidianas, com o uso de geometrias quadriláteras, triangulares, circulares, elípticas; as não-Euclidianas, cuja principal referência é a geometria fractal; as formas bioinspiradas, que são baseadas em formas e padrões encontrados na natureza. Entre as tentativas realizadas na busca de modelar as geometrias encontradas na natureza destacam-se: a série de Fibonacci, os fractais, a superfórmula de Gielis, as diversas curvas geradas pelas equações polares, etc [7].

As transformações geométricas obtidas a partir de funções polares assemelham-se de certa forma aos fractais nos seguintes aspectos: sua definição matemática é simples; o processo de geração de uma figura polar é iterativo; conforme o número de iterações aumenta, o perímetro de um elemento polar aumenta, enquanto sua área total ocupada permanece constante [7].

Nesta dissertação são analisadas as propriedades ressonantes, em termos do coeficiente de transmissão, das superfícies seletivas em frequência com elementos gerados por equações polares e impressas em dois tipos de substratos dielétricos (FR-4 e vidro). Esta análise é inicialmente realizada com o uso do *software* de simulação eletromagnética, ANSYS Designer™, que utiliza o método numérico de onda completa MoM (*Method of Moments* – Método dos Momentos). A partir destas simulações, são extraídos os dados de frequências de ressonância e de largura de banda dos filtros espaciais FSS abordados. Após a análise dos resultados obtidos são selecionadas as FSS para a fabricação de protótipos. A validade da metodologia adotada é verificada através da comparação entre os resultados de simulação e medição dos protótipos de FSS fabricados.



## 1.1 Organização do texto

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre *wireless building*, apresentando projetos e aplicações de superfícies seletivas em frequência.

No Capítulo 3 é apresentada uma fundamentação teórica sobre as superfícies seletivas em frequência, abordando tipos de elementos, métodos de análise e técnicas de medição.

No Capítulo 4 são apresentadas algumas equações polares usadas para o desenho de elementos dos protótipos propostos, tal como, a superfórmula de Gielis. Em seguida, no Capítulo 5 é apresentada a metodologia para o desenvolvimento dos protótipos com elementos polares.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados simulados e medidos das superfícies seletivas em frequência abordadas com substratos de fibra de vidro (FR-4) e vidro.

No Capítulo 7 são feitas as conclusões desta dissertação, além de propostas para trabalhos futuros.

## 2 *Wireless Building* - Conceito e Aplicações

A tecnologia sem fio contribui na simplificação de uma rede local, permitindo que vários computadores e usuários compartilhem recursos simultaneamente em residências, empresas, instalações públicas, entre outros ambientes sem a presença de fios. Com a crescente utilização dessa tecnologia, surgem novas técnicas que buscam desenvolver melhorias e reduzir falhas de vulnerabilidade. O conceito emergente conhecido como *wireless building* destaca-se nesse contexto por modificar fisicamente o ambiente de propagação *indoor* através da aplicação de técnicas de construção, que modificam as estruturas e materiais das edificações, de tal forma, que elas exibam propriedades eletromagnéticas específicas.

A aplicação dessas técnicas de construção para sistema de comunicações sem fio é realizada na fase inicial de projeto de uma edificação, ou seja, de forma paralela com as outras instalações convencionais, tais como: elétrica, hidráulica, gás canalizado, etc. Iniciar o projeto de instalação desses sistemas a medida que os prédios são construídos, evita interrupções significativas no processo de construção além de diminuir custos consideráveis envolvidos no desenvolvimento das adaptações.

Os projetos de edificações têm utilizado FSS em paredes de edifícios, através da impressão de um padrão metálico num substrato dielétrico fino (filme fino ou papel de parede) que podem ser instalados diretamente na parede [8]. A Figura 1 apresenta um papel de parede seletivo em frequência para bloqueio de sinais GSM (*Global System for Mobile Communications* – Sistema Global para Comunicações Móveis) [8]. Outro projeto que consistia no controle de propagação é proposto em [9]. O objetivo foi a construção de uma FSS funcionando como papel de parede seletivo em frequência capaz de influenciar a propagação do sinal dentro de edifícios, buscando encontrar soluções para os problemas de interferência e segurança da informação, sem degradar os serviços de emergência que utilizam sistemas de rádio em outras faixas de frequências [9].



Figura 1: Papel de parede seletivo em frequência [8].

A propagação dentro dos edifícios tem uma estrutura multipercurso mais complexa quando comparada ao espaço livre [10]. Isso ocorre principalmente devido à complexidade da estrutura do edifício, a configuração das salas e, mais importante, os materiais utilizados na construção [11]. A utilização de superfícies seletivas em frequência em materiais de construção deve ser feita de forma cautelosa. A resposta em frequência está fortemente ligada ao substrato e o ângulo de incidência da estrutura. Com isso, faz-se necessário considerar as propriedades dielétricas e a espessura do substrato das FSS quando aplicadas diretamente na parede de um edifício.

Outra aplicação de filtros espaciais FSS bastante conveniente em projetos de edificações é a utilização destas superfícies na cobertura metálica de vidros [2]. O uso de um revestimento metálico fino na estrutura de janelas modernas é uma maneira produtiva de economizar energia, que pode funcionar simultaneamente como filtro espacial para ondas de rádio. O revestimento atenua a radiação eletromagnética na região do infravermelho, bloqueando a transmissão de calor do exterior para o interior do ambiente no verão e vice-versa durante o inverno. Estas janelas especiais são chamadas de janelas de baixa emissividade (*low-e*) ou janelas de economia de energia (*energy saving windows*) e estão comercialmente disponíveis em larga escala, sendo utilizadas em muitos edifícios e veículos [2], [12–14].

Em [4] é proposta uma janela seletiva em frequência. A FSS consiste de um arranjo periódico de aberturas hexagonais no revestimento da janela. A estrutura é composta por uma camada de óxido metálico imposta no vidro. A Figura 2 apresenta uma ilustração de uma janela seletiva em frequência.

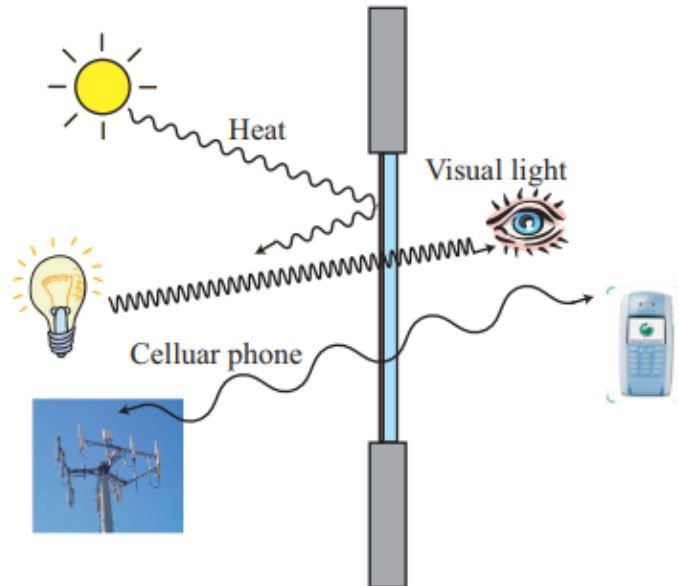


Figura 2: Ilustração de uma janela seletiva em frequência [4].

A FSS é aplicada como um filtro passa-faixas para as frequências de GSM, GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global) e UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System* - Sistema Universal de Telecomunicações Móveis 0,9 - 2,0 GHz). A Figura 3 apresenta a imagem da janela desenvolvida.



Figura 3: Janela revestida com aberturas hexagonais [4].

Uma parede seletiva em frequência é apresentada em [15]. Na parede foi anexada uma superfície seletiva em frequência como filtro rejeita-faixas. O papel utilizado foi uma folha de alumínio adesiva cortada no formato de um arranjo do tipo *loop* quadrado. Estes foram colados em uma espécie de cartão de papel fino para segurar cada elemento no lugar. As medições mostraram que essa parede seletiva em frequência filtrou sinais entre as faixas de frequência 5,4 - 6,0 GHz.

Uma proposta de uma FSS usando *loop* de elementos modificados para bloquear sinais de telefones móveis em instalações públicas é descrita em [16]. A maioria das janelas de edifícios modernos usam grandes painéis de vidro, com uma abertura de ar entre elas. Com isso, duas FSS são inseridas nos lados superior e inferior do par de vidros. Esse modelo de filtro espacial também pode ser usado para casas ou apartamentos perto de estações base de telefones ou utilizados como janelas nos escritórios para proteger os trabalhadores de exposição à energia eletromagnética ambiental [16].

Uma superfície seletiva em frequência absorvedora é proposta em [17] para segurança de redes locais sem fio. A FSS é projetada para duas frequências de interesse, ou seja, 2,45 GHz (banda inferior) e 5,25 GHz (banda superior), respectivamente. Um estudo recente que envolve o uso de superfícies seletivas em frequência que podem transmitir bandas GSM de 900 MHz e 1,8 GHz, mas inibem a transmissão de bandas de rede local sem fios (WLAN), é proposto em [18]. A FSS possui uma dupla camada inserida sobre um substrato de vidro.

Os filtros espaciais FSS rejeita-faixas também podem funcionar como refletores para aumentar cobertura de uma rede sem fio. Por exemplo, os sinais desejados podem ser aprimorados por refletores eletromagnéticos instalados no final de corredores. Em [19] é apresentado um estudo para mostrar que a propagação dentro de edifícios pode ser potencializada usando técnicas com base em superfícies seletivas em frequência. A Figura 4 ilustra um exemplo de como poderia ser utilizado esse sistema.

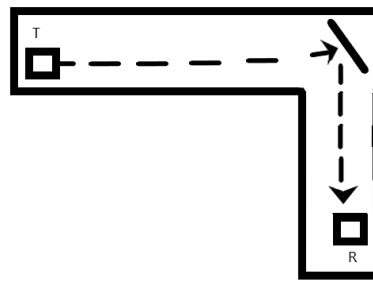


Figura 4: Ilustração de aumento de cobertura *indoor* entre dois corredores com o uso de filtro espacial FSS rejeita-faixas.

É possível observar a viabilidade da utilização destas estruturas em ambientes *indoor*. O conceito de “*wireless building*” surge como uma inovação para projetos de edificações modernas, apresentando técnicas para diversas aplicações que envolvem a comunicação sem fio. Diante disso, a utilização de superfícies seletivas em frequência nesses projetos propicia a redução de custos, proporcionando a utilização dessas estruturas como filtros espaciais rejeita-faixas em diversas aplicações para redes locais sem fio.

As tecnologias de comunicação sem fio utilizam diversas faixas de frequências com normas específicas que regulam sua utilização. As especificações do 802.11 foram desenvolvidas especificamente para redes de área local sem fio (WLANs) pelo IEEE e incluem quatro subconjuntos de padrões de protocolo baseados em Ethernet: 802.11, 802.11a, 802.11b e 802.11g.

Os protótipos abordados nesta dissertação foram desenvolvidos para operar nas faixas de frequências dos padrões 802.11a e 802.11b. O 802.11a opera na faixa de 5 - 6 GHz com taxas de dados comumente de 6 Mbps, 12 Mbps, ou 24 Mbps. Esse protocolo usa a Multiplexação de Divisão de Frequência Ortogonal (OFDM), as taxas de transferência de dados podem ser tão alto quanto 54 Mbps. O padrão 802.11b (também conhecido como Wi-Fi) opera na faixa de 2,4 GHz com taxas de dados de até 11 Mbps. Este padrão usa uma tecnologia conhecida como modulação por chaveamento de código (CCK), que permite taxas de dados mais altas com menos chance de multi-caminho e interferência de propagação.

### 3 Superfícies Seletivas em Frequência

A descoberta de David Rittenhouse em meados do século 18 é apontada como uma das primeiras referências de superfícies seletivas em frequência. O método envolvia a investigação de grades de difração ópticas, uma vez que, esse fenômeno era usado para decompor um feixe de luz não monocromática em suas ordens espectrais [15]. No experimento, o físico desenvolveu um anteparo com fios igualmente espaçados posicionados em direção à luz, dessa forma pode-se observar a filtragem da luz branca dentro de uma faixa de comprimentos de onda distintos.

O estudo desenvolvido por Rittenhouse demonstrou a dependência da resposta em frequência com as dimensões físicas do protótipo desenvolvido. Desde então, este método é a base para os princípios de superfícies seletivas em frequência. No ano de 1919, Marconi e Franklin foram os primeiros nesta área por sua contribuição em um refletor parabólico feito de seções de fios de meio comprimento de onda [20].

Os estudos sobre superfícies seletivas em frequência se tornaram mais evidentes na década de 1960 com o desenvolvimento de aplicações militares. A tecnologia *stealth* (discrição) apresenta aplicações de FSS atualmente. Este método consiste na capacidade de operar sem conhecimento do inimigo. Na primeira guerra mundial já existiam alguns estudos com intuito de dificultar a visibilidade das aeronaves que atuavam nos campos de batalha [21].

Os radomes são os filtros espaciais usados para reduzir a seção reta de radar fora da faixa de operação de um sistema de antenas. O programa norte-americano de pesquisa espacial da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) Voyager, iniciado em 1977 explorava uma superfície seletiva em frequência para a implementação de um refletor em duas bandas de frequência.

Neste sentido, dependendo da aplicação, é importante se atentar para a estrutura do projeto de uma FSS. A utilização de materiais específicos e o formato dos seus elementos influenciam diretamente nos parâmetros eletromagnéticos do protótipo desenvolvido.

### 3.1 Estruturas e características

Uma superfície seletiva em frequência é um arranjo periódico de elementos aberturas ou *patch* condutores. Uma superfície periódica ideal consiste basicamente em um conjunto de elementos idênticos dispostos na forma de um arranjo bidimensional infinito [22]. A concepção de uma FSS leva em consideração o seu formato, o substrato, a frequência e o tipo de elemento, seja este de abertura ou *patch*.

A periodicidade e o formato dos elementos de uma FSS são de extrema importância para determinar a frequência de operação do dispositivo. Esses parâmetros exercem influência na largura de banda e perda por inserção. A perda por inserção é definida como a diferença, em dB, da onda eletromagnética incidente em uma posição específica do receptor, antes e após a instalação da FSS [23]. Quando uma onda eletromagnética incide sobre a FSS, cada elemento ressoa e dissipa energia em torno da sua frequência de ressonância ( $f_r$ ). A onda incidente é transmitida para frente e parcialmente refletida na direção especular, ou seja, a luz de uma única direção de entrada (um raio) é refletida em uma única direção de saída [2].

Este comportamento é descrito pela lei de reflexão, uma vez que, a direção da luz de entrada (o raio incidente), e a direção da luz refletida de saída (o raio refletido) fazem o mesmo ângulo em relação à superfície normal, assim, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, são coplanares, ou seja, pertencem ao mesmo plano, chamado de plano de incidência. A Figura 5 apresenta uma ilustração de uma FSS com elementos do tipo abertura, ou seja, funciona como um filtro passa-faixas, e uma FSS com elementos *patches* condutores que atua como um filtro rejeita-faixas.

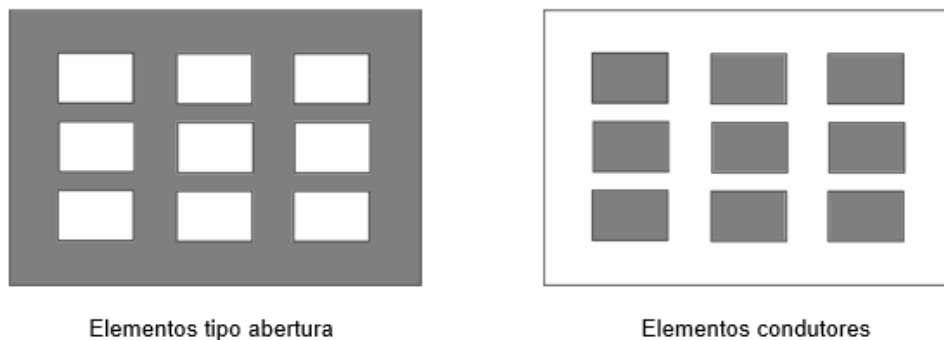


Figura 5: Ilustração de elementos do tipo abertura e *patch*.



Uma FSS pode ainda ser definida como sendo de anteparo-fino ou anteparo-espesso, dependendo da espessura da camada de metalização. O termo FSS anteparo-fino, usualmente, refere-se a um anteparo com elementos do tipo circuito impresso, isto é, elementos tipo *patch* ou abertura, que possuem uma espessura menor que  $0,001 \lambda$ , em que  $\lambda$  é o comprimento de onda na frequência de ressonância do anteparo.

Algumas de suas principais vantagens são listadas abaixo:

- Peso leve;
- Baixo custo de fabricação;
- Compatível com circuito impresso convencional.

A FSS tipo anteparo espesso possui uma camada de metalização mais espessa ou uma camada dupla de metalização, consistindo em duas FSS idênticas separadas por um dielétrico [24]. Esses dispositivos são comumente utilizados para aplicações passa-altas (tipo abertura) apresentando uma espessura eletricamente grande.

### 3.2 Elementos de FSS

Como já supracitado uma FSS possui em sua composição elementos dispostos periodicamente, que podem ser do tipo *patch* ou abertura. Os elementos podem assumir formas diferentes, uma vez que o formato do *patch* ou abertura influencia na distribuição de corrente e conseqüentemente na distribuição do campo na superfície da FSS, como também no nível de polarização cruzada [2]. A polarização cruzada refere-se aos campos eletromagnéticos espalhados pela estrutura periódica, polarizados verticalmente ou horizontalmente, devidos à incidência de campos polarizados horizontalmente ou verticalmente, respectivamente [25]. Alguns exemplos de elementos são demonstrados na Figura 6: dipolo, circular, dipolo cruzado, cruz de Jerusalém, espira circular, espira quadrada, etc.

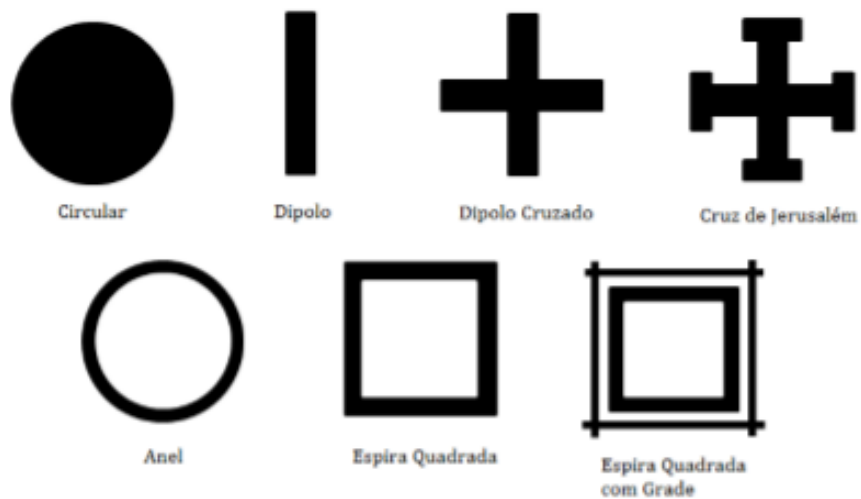
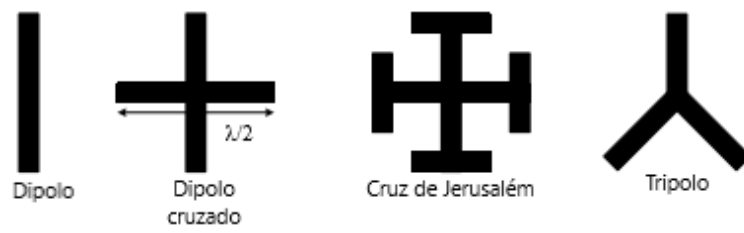


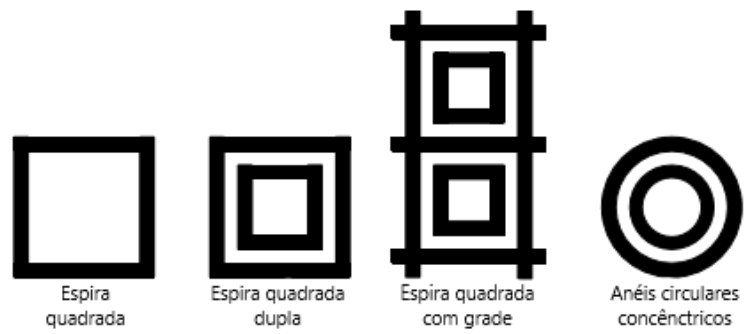
Figura 6: Tipos de elementos de uma FSS [26]

Os elementos de FSS podem ser divididos em quatro grupos principais. A Figura 7 apresenta ilustrações dos tipos de elementos citados [22].

- Grupo 1 - São os N-polos conectados pelo centro: como dipolos, tripolos, Cruz de Jerusalém e dipolos cruzados;
- Grupo 2 - Espiras: como espiras quadradas e circulares;
- Grupo 3 - Sólidos: composto pelos elementos sólidos, ou tipos *patch* de várias formas, por exemplo, quadrados, círculos e hexágonos;
- Grupo 4 - Combinações: formado por padrões que envolvem combinações de elementos ligados pelo centro, espiras ou formas de interior sólido.



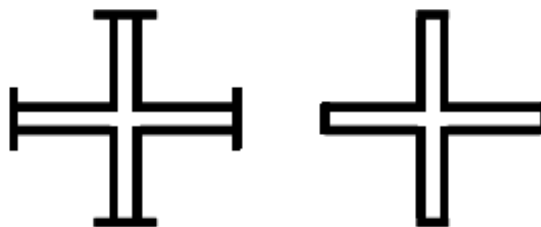
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7: Tipos de elementos de uma FSS: (a) Grupo 1: N-polos conectados pelo centro; (b) Grupo 2: Espiras; (c) Grupo 3: Interior sólido; (d) Grupo 4: Combinações.

O processo de fabricação e a disposição dos elementos na estrutura também são importantes para a execução do projeto. O resultado do espalhamento proveniente de cada elemento do arranjo é caracterizado como reflexão ou transmissão [21]. Esse fato ocorre mesmo quando o ângulo de incidência não é normal ao plano formado pelo arranjo, visto que o atraso da corrente de superfície induzida entre os elementos vizinhos, mantém o comportamento de reflexão na direção dos campos irradiados. Com isso, para os demais comprimentos de ondas incidentes sobre a estrutura, a superfície seletiva em frequência se comporta de forma “transparente” [27]. A espessura e a permissividade elétrica do substrato dielétrico também são aspectos que podem influenciar no desempenho da FSS. Essas características podem modificar o comprimento de onda do sinal bem como a faixa de ressonância do dispositivo.

### **3.3 Métodos de análise**

As técnicas de análise de superfícies seletivas em frequência podem ser divididas em classes diferentes: técnica de teoria de circuitos, técnicas de expansão modal e técnicas iterativas. Um dos primeiros modelos utilizados para análise das superfícies seletivas em frequência foi o procedimento de casamento modal [28, 29]. Este processo consiste em uma análise capaz de fornecer minúcias da resposta em frequência e polarização.

A técnica mais difundida na bibliografia é chamada de método do circuito equivalente (MCE). Neste procedimento, os vários segmentos de fita que formam o arranjo periódico são modelados como componentes indutivos e capacitivos em uma linha de transmissão. Nesta técnica, o espaço livre é representado por uma linha de transmissão de  $377 \Omega$ , e a partir da solução das equações clássicas de linha de transmissão, é possível obter as características de reflexão e transmissão da FSS [30]. Utiliza-se uma aproximação quase estática para calcular as componentes do circuito permitindo uma rápida resposta computacional.

Com o avanço dos computadores digitais, a aplicação de métodos mais precisos, denominados métodos de onda completa, tornou-se viável apesar do elevado custo computacional requerido. Diferente dos métodos empíricos, essa técnica apresenta

uma grande quantidade de formulações matemáticas e resultados mais precisos ao custo de um esforço computacional elevado. Dentre os métodos existentes os que se destacam são:

- Método dos Momentos (MoM - *Method of Moments*);
- Técnica das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD – *Finite-Difference Time Domain*);
- Método dos Elementos Finitos (FEM – *Finite-Element Method*).

O Método dos Momentos (MoM - *Method of Moments*) é a técnica mais utilizada para análise de FSS. O estudo mais antigo referido na literatura é a abordagem apresentada por Chen usando o MoM [30]. A abordagem de Chen é também conhecida como o método da expansão modal (ou método da equação integral). Este método avalia o fluxo de corrente sobre os elementos condutores, combinando o campo tangencial à superfície do elemento e formando uma equação integral para a corrente desconhecida [31, 32].

A técnica FDTD, ao contrário do MoM e FEM, que analisam a estrutura periódica no domínio da frequência, é uma técnica no domínio do tempo. A solução através do método FDTD abrange uma ampla faixa de frequências em uma única simulação [32–35]. No método FEM os elementos finitos são conectados entre si por pontos, os quais são denominados de nós ou pontos nodais. Ao conjunto de todos esses itens – elementos e nós – dá-se o nome de malha. Em função dessas subdivisões da geometria, as equações matemáticas que regem os comportamentos físicos não serão resolvidas de maneira exata, mas de forma aproximada por este método numérico. A precisão do Método dos Elementos Finitos depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha, ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número deles em uma determinada malha, maior a precisão nos resultados da análise. O programa comercial ANSYS Designer™ utilizado nas simulações das superfícies seletivas em frequência abordadas nesta dissertação implementa o MoM.

### 3.4 Técnicas de medição

As características de transmissão e reflexão de uma superfície seletiva em frequência pode ser medida através de diversos métodos, dessa forma faz-se necessário a construção da mesma. Uma das técnicas de medição mais populares é ilustrada na Figura 8. A estrutura sob teste é posicionada entre duas antenas diretivas, de ganhos conhecidos, sendo uma antena transmissora do sinal e outra receptora. Alterando a polarização de vertical para horizontal, os modos TE e TM podem ser avaliados. As antenas são separadas por uma distância de modo que a onda incidente esteja na região de campo distante. A medição é composta de um medidor de campo e um gerador de varredura [7]. Entretanto, esse método pode produzir resultados não tão precisos comparados com outros métodos.

Apesar desta técnica ser comumente utilizada, as bordas da superfície medida podem gerar difração do sinal, com isso gerando resultados imprecisos. Dado o tamanho finito do painel de teste e, dependendo de sua distância para as antenas, as difrações nas bordas do painel poderão ser tão fortes de modo a causar sobreposição ao sinal real [32]. A adição de absorvedores nas bordas das estruturas pode reduzir esse problema, um exemplo pode ser visto na ilustração da Figura 8.

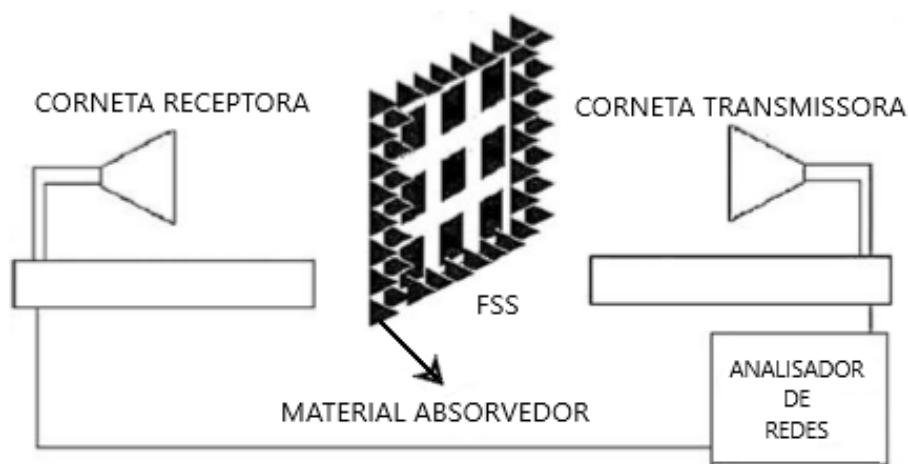


Figura 8: Arranjo de medição de uma FSS com material absorvedor [7].

Outra técnica de medição que pode ser utilizada é o uso de antenas cornetas e lentes. Esse método pode servir como contorno para a configuração anterior, uma vez que, o sinal concentrado transforma a onda inicial esférica em um feixe colimado de ondas planas. Com isso, este arranjo permite medições mais precisas do desempenho

de transmissão e reflexão de ondas na FSS com polarizações TE e TM [32], [36]. A Figura 9 ilustra esse tipo de técnica de medição.

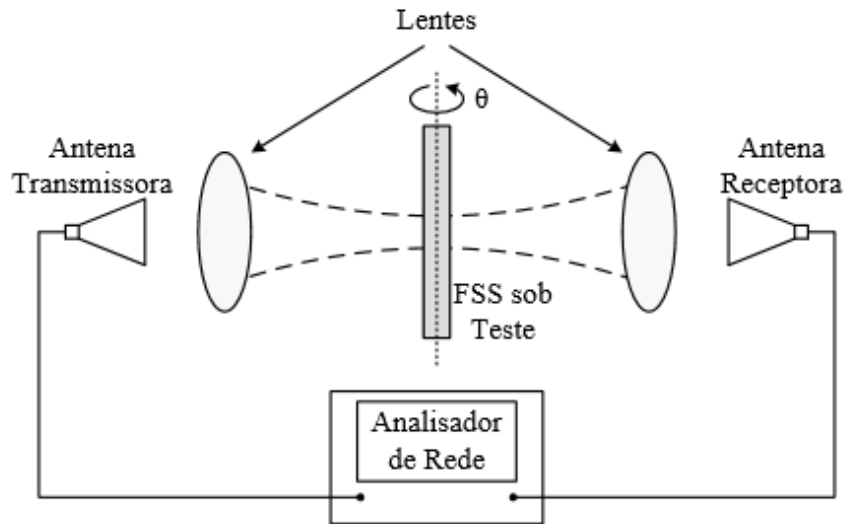


Figura 9: Arranjo de medição de uma FSS com lentes Gaussianas [32].

### 3.5 Aplicações

No Capítulo 2 dessa dissertação foram apresentadas diversas aplicações que envolvem filtros espaciais FSS em construções. A utilização de FSS pode ser verificada em outras aplicações destacando-se, por exemplo: antenas, radomes, mísseis, blindagens eletromagnéticas, filtros de micro-ondas e absorvedores de micro-ondas.

As aplicações de FSS são atrativas em projetos de engenharia devido ao custo reduzido dos materiais utilizados para sua fabricação, bem como, devido à facilidade de integração com outros circuitos de micro-ondas. Uma aplicação cotidiana de FSS facilmente encontrada é em portas de fornos de micro-ondas. O forno de micro-ondas possui uma porta de vidro com aberturas circulares (Figura 10). Neste caso, a FSS aplicada à porta de vidro atua como uma blindagem eletromagnética, isto é, um filtro espacial rejeita-faixas, que bloqueia a radiação na faixa de micro-ondas, porém permite que a faixa da luz visível atravesse a porta para que o usuário monitore o processo de cozimento.



Figura 10: Aplicação de FSS como anteparo na porta do forno de micro-ondas [37]

A largura de banda de antenas utilizadas nos sistemas UWB (*Ultra Wide Band*), causam grande radiação em determinadas situações [37]. Dessa forma, com o intuito de evitar essas interferências, faz-se necessário criar formas para que o sistema desenvolvido permita a transmissão ou reflexão em determinadas frequências, diminuindo assim qualquer possível descontinuidade. Neste cenário, é possível a utilização de uma FSS operando como um filtro passivo, uma vez que, seus elementos ressonantes individuais podem transmitir ou refletir sua frequência específica [38], [39].

No projeto de radomes é possível a aplicação de filtros espaciais FSS. A resposta em frequência da FSS é ajustada para produzir características de um filtro espacial passa-faixas nas frequências de operação da antena. Desta forma, o radome torna-se praticamente transparente para os sinais transmitidos pela antena com um mínimo de perda de inserção. Nas frequências fora da banda, a FSS pode apresentar características de reflexão, e o radome é projetado para o uso acoplado à superfícies de automóveis ou aeronaves, de forma a garantir um espalhamento mínimo do sinal [2].



## 4 Transformações Polares

### 4.1 Coordenadas polares

O sistema de coordenadas polares (ver Figura 11) utiliza um único eixo, onde consideramos uma semi-reta horizontal e fixa, chamada de eixo polar, e de origem num ponto  $O$ , chamado de pólo. Qualquer ponto  $P$  do plano será localizado no sistema de coordenadas polares pelo par  $(r, \theta)$  denominado coordenadas polares, onde  $r$  indica a distância do ponto  $P$  ao pólo  $O$  e é denominado raio vetor ou raio polar, e o ângulo  $\theta$  obtido da rotação do eixo polar até o segmento  $OP$ , é chamado de ângulo vetorial ou ângulo polar de  $P$  [40]. Na trigonometria,  $\theta$  é positivo quando medido em sentido anti-horário e negativo quando medido em sentido horário. O ângulo associado a um determinado ponto não é único. Embora um ponto no plano só possua um par de coordenadas cartesianas, no sistema de coordenadas polares um ponto pode ser representado por infinitos pares de coordenadas polares [41].

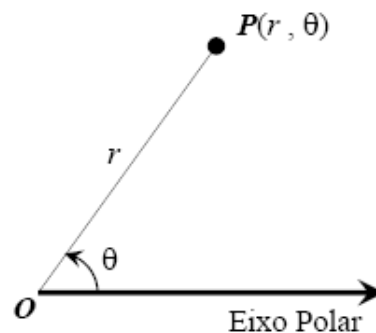


Figura 11: Sistema de coordenadas polares.

As funções trigonométricas como o seno e o cosseno são bastante utilizadas para geração de curvas em coordenadas polares. Por exemplo, a Figura 12 apresenta gráficos de rosáceas utilizando as equações (1) e (2), em que,  $n$  é o número de pétalas e  $A$  o raio.

$$r(\theta) = A \cdot \cos(n\theta) \quad (1)$$

$$r(\theta) = A \cdot \sin(n\theta) \quad (2)$$

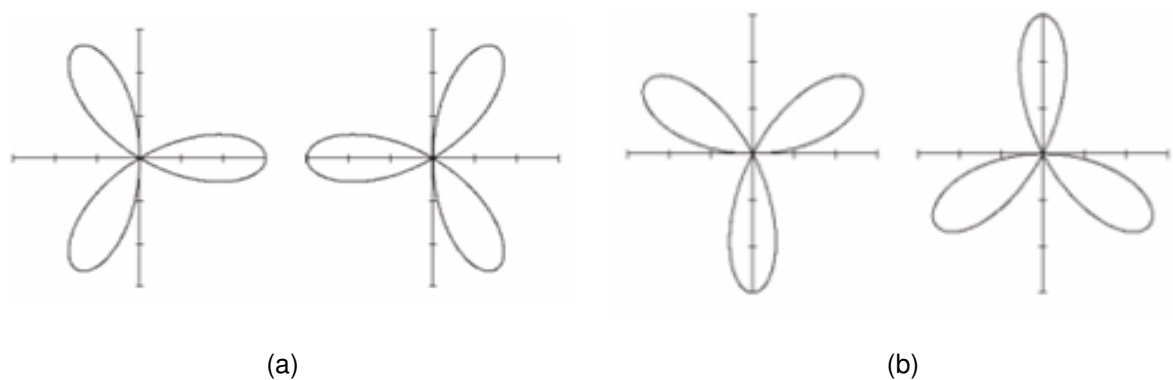


Figura 12: Gráficos em coordenadas polares de rosáceas: (a) a partir da equação (1); (b) a partir da equação (2).

Variando o parâmetro  $n$  (ver Figura 13) das equações (1) ou (2) é possível obter uma curva que tem a forma de uma flor adornada. Esta curva foi nomeada rhodonea pelo matemático italiano Guido Grandi entre 1723 e 1728 porque se assemelha a uma rosa [42].

- Se  $n$  for par a rosa é  $2n$  petalada;
- Se  $n$  for ímpar a rosa é  $n$  petalada.

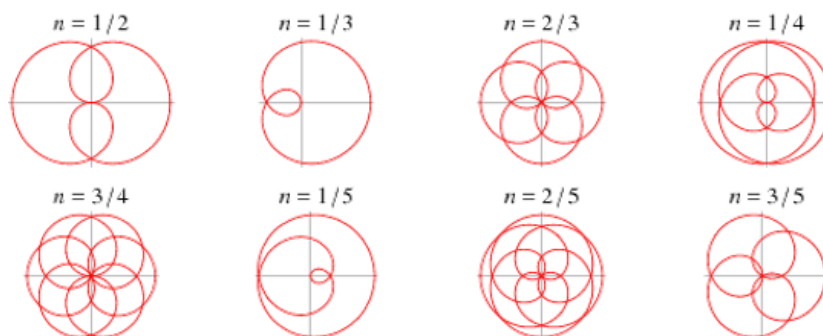


Figura 13: Efeito da variação do parâmetro  $n$  na equação polar da rosácea [42].

Um exemplo particular de equação polar que foi utilizada nessa dissertação é a superfórmula de Gielis. A priori, esta equação foi desenvolvida originalmente para descrever formas de planta. Gielis definiu a superfórmula como “Uma transformação geométrica genérica que unifica uma ampla gama de formas naturais e abstratas” [43]. A Figura 14 apresenta algumas propostas de elementos de FSS obtidos a partir de estudos preliminares utilizando a superfórmula de Gielis: *patches*, espiras, e espiras compostas.

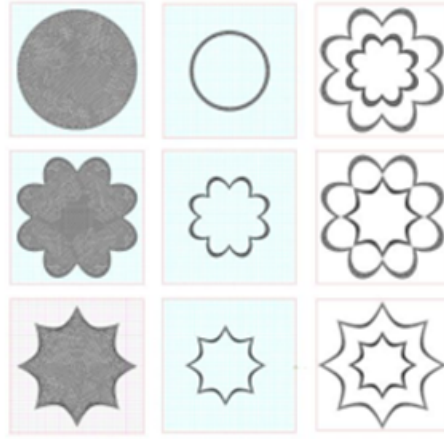


Figura 14: Exemplos de elementos de FSS obtidos a partir da superfórmula de Gielis [7]

## 4.2 Superfórmula de Gielis

A superfórmula é uma generalização da super-elipse e foi proposta pela primeira vez por Johan Gielis [43]. O mesmo sugeriu que a fórmula pode ser usada para descrever muitas formas complexas e curvas que são encontradas na natureza. Uma única equação pode gerar uma vasta diversidade de formas naturais. A superfórmula, gera desde simples triângulos e pentágonos até estrelas, espirais e pétalas.

Gabriel Lamé a partir do estudo de Piet Hein, generalizou o conceito de uma elipse a uma super-elipse [44]. As curvas são definidas pela equação (3), e percebendo suas desvantagens com relação à simetria limitada de geometrias geradas por essa equação, Gielis introduziu coordenadas polares do tipo  $r = f(\theta)$  substituindo-se  $x$  por  $r \cdot \cos(\theta)$  e  $y$  por  $r \cdot \sin(\theta)$  na equação (3) e inserindo-se o fator multiplicativo  $m/4$  para o ângulo  $\theta$  [43]. Com essas alterações obtém-se a equação polar (4), denominada superfórmula. A partir de (4), muitas formas com simetrias rotacionais podem ser obtidas simplesmente alterando as variáveis  $a, b, m, n_1, n_2, n_3$ .

$$\left|\frac{x}{a}\right|^t + \left|\frac{y}{b}\right|^t = 1 \quad (3)$$

$$r(\theta) = \frac{1}{\left\{ \left[ \left( \left| \frac{1}{a} \cos\left(\theta \frac{m}{4}\right) \right| \right)^{n_2} + \left( \left| \frac{1}{b} \sin\left(\theta \frac{m}{4}\right) \right| \right)^{n_3} \right]^{\frac{1}{n_1}} \right\}} \quad (4)$$

## 5 Metodologia

Os elementos polares propostos para o desenvolvimento de filtros espaciais FSS abordados nesta dissertação foram obtidos a partir da superfórmula de Gielis, cuja implementação foi feita em MATLAB®. Os formatos dos elementos polares são convertidos em arquivos com formato DXF (*Drawing Exchange Format*) através de uma biblioteca MATLAB®. Esta conversão possibilita a importação dos formatos dos elementos polares para o ambiente do ANSYS Designer™, *software* de análise de onda completa utilizado para simulação precisa das superfícies seletivas em frequência abordadas. A Figura 15 apresenta o diagrama em blocos com as etapas da metodologia adotada para a obtenção dos protótipos desenvolvidos nesta dissertação.

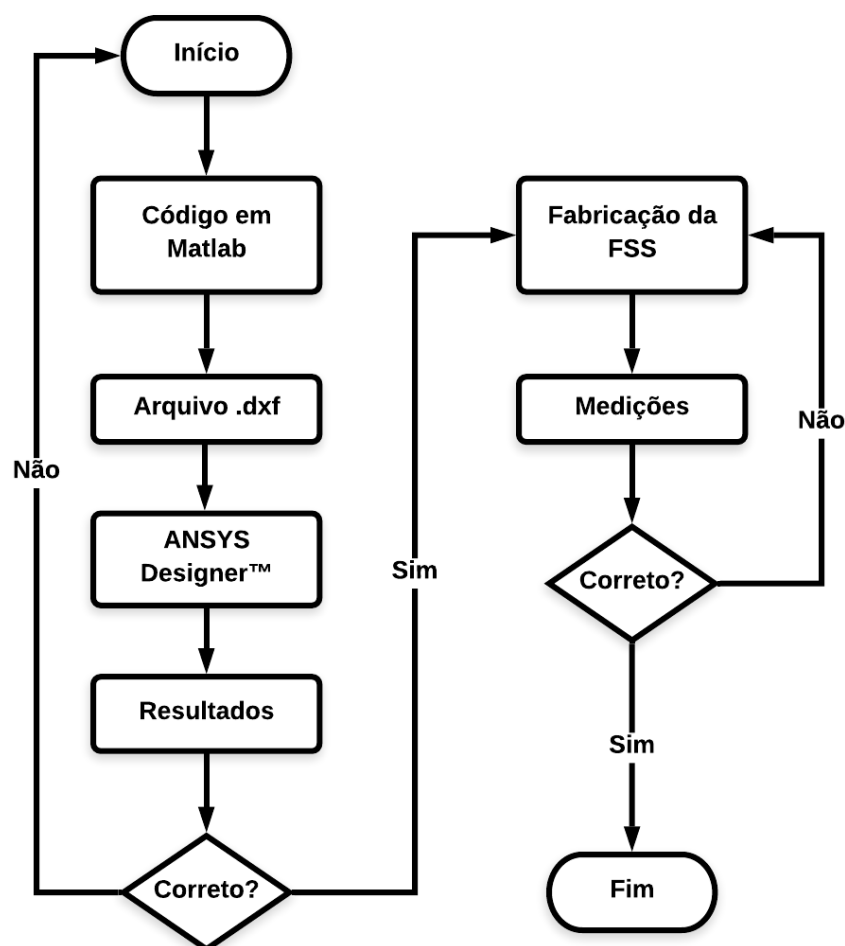


Figura 15: Diagrama em blocos: metodologia adotada para o desenvolvimento de protótipos de filtros espaciais FSS com elementos polares.

## 5.1 FSS Circular

A primeira FSS foi projetada com duas espiras circulares para cada espira ressoar em uma determinada frequência. A espira maior em 2,45 GHz e a menor em 5,5 GHz. Os valores para o raio de cada espira foram obtidos de forma empírica. A espira maior possui raio igual a 15,2 mm e a menor possui raio igual a 9 mm. Foram realizadas simulações mantendo os valores dos raios citados anteriormente e variando-se a espessura de cada espira, com intuito de verificar a influência desse parâmetro na resposta em frequência e propriedades de transmissão da FSS. As espiras foram obtidas pela ferramenta de projeto circular já disponibilizada pelo ANSYS Designer™. As espiras geradas são ilustradas na Figura 16.

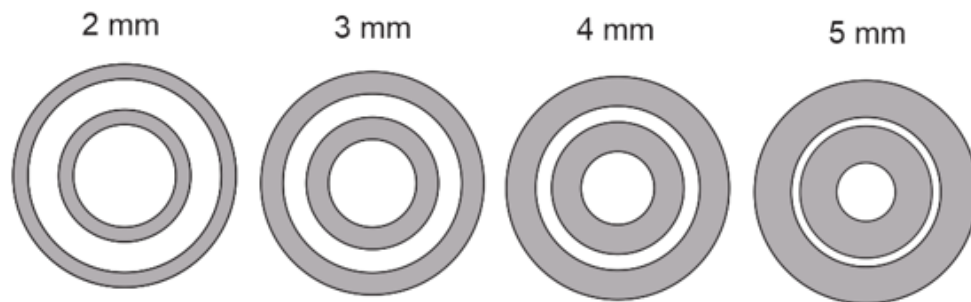


Figura 16: Variação da espessura das espiras polares.

Na Figura 17 é apresentada a célula unitária da FSS com espessura da espira de 2 mm e periodicidade de 33 mm que foi projetada no ANSYS Designer™.

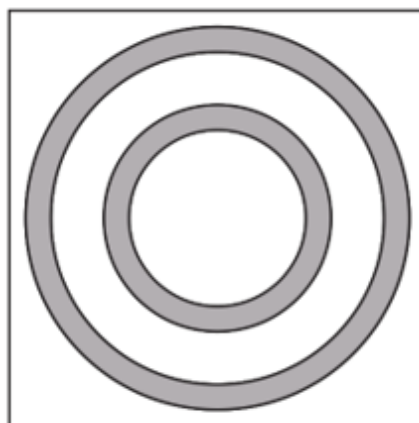


Figura 17: Célula unitária com duas espiras circulares.

## 5.2 FSS com elementos do tipo espira polar

Os elementos propostos na forma de espiras polares é bem apropriado para o projeto de FSS para aplicações *indoor*, uma vez que possibilita o desenvolvimento destes filtros espaciais para uso em diferentes partes de uma edificação, tais como, janelas, portas, paredes, divisórias, etc, principalmente em dois aspectos: estético e, no caso da aplicação em janelas, não impede a passagem da luz visível. A facilidade de sintonia, a independência em relação a polarização da onda eletromagnética incidente, bem como a estabilidade da frequência de operação em relação ao ângulo de incidência, são fatores importantes principalmente em aplicações *indoor* de redes locais sem fio.

Para o projeto das superfícies seletivas em frequência com elementos do tipo espiras polares adotou-se o mesmo procedimento usado para as FSS com espiras circulares, ou seja, cada espira é projetada para uma determinada frequência: a espira maior para 2,45 GHz e a espira menor para 5,5 GHz. Os formatos dos elementos das superfícies seletivas em frequência abordadas foram gerados através da equação (4), implementada em MATLAB® com  $\theta$  variando de  $0 - 2\pi$  a passos de  $\frac{\pi}{360}$ . A Figura 18 ilustra uma célula unitária da FSS-1 com duas espiras polares côncavas.



Figura 18: Célula unitária da FSS-1 duas espiras polares côncavas.

A segunda FSS (FSS-2) proposta nesta dissertação também foi gerada a partir da equação (4). Foram combinados dois tipos de espiras (côncava e convexa) com geometrias distintas, seguindo a ideia de cada espira ressonar para uma frequência determinada, como já supracitado. A ilustração da célula unitária da FSS 2 é apresentada na Figura 19.

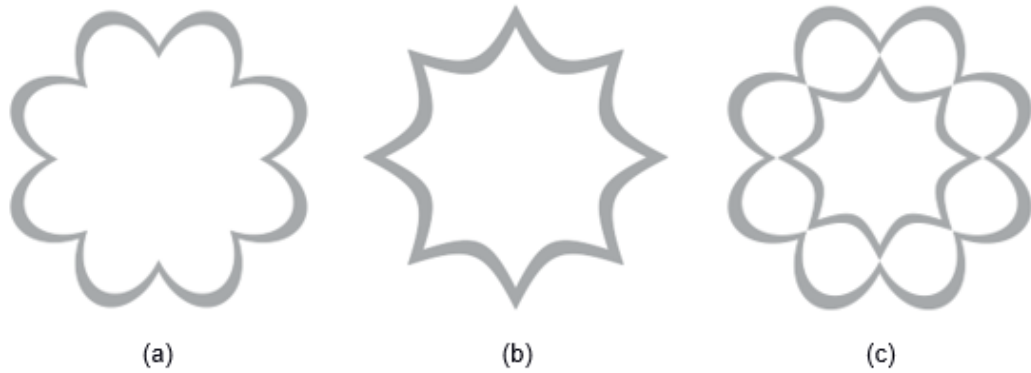


Figura 19: Elemento de FSS gerado no MATLAB® : (a) espira maior; (b) espira menor; (c) elemento composto com duas espiras polares - côncava e convexa.

O protótipo da FSS-3 (ver Figura 20) é formado por elementos compostos, isto é, um *patch* com uma abertura em forma de espira.

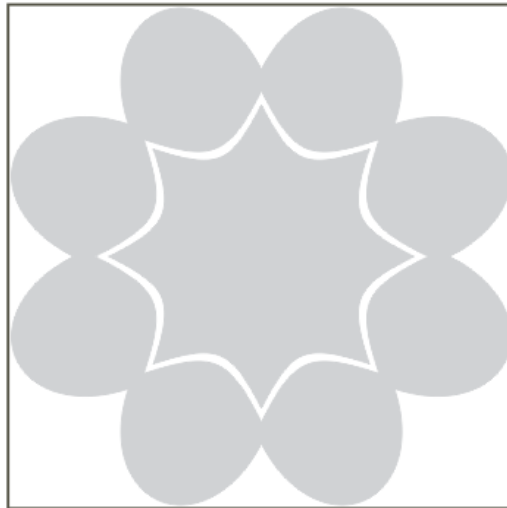


Figura 20: Elementos de FSS *patch* com abertura em forma de espira polar: FSS-3 com *patch* convexo e abertura em forma de espira côncava.

Os mesmos parâmetros utilizados na FSS-2 também foram aplicados no projeto da FSS-4, distinguindo no  $r$  = raio,  $w$  = espessura das espiras e  $p$  = periodicidade da célula unitária. O projeto do formato das espiras da FSS-5 foi proposto a partir do

cruzamento de duas espiras polares. De maneira diferente das espiras já apresentadas, este protótipo foi desenvolvido com o intuito de funcionar em apenas uma banda de operação. A ilustração do formato das espiras polares cruzadas pode ser visto na Figura 21. Os valores usados para os projetos de todas as espiras nesta dissertação são dados na Tabela 1.

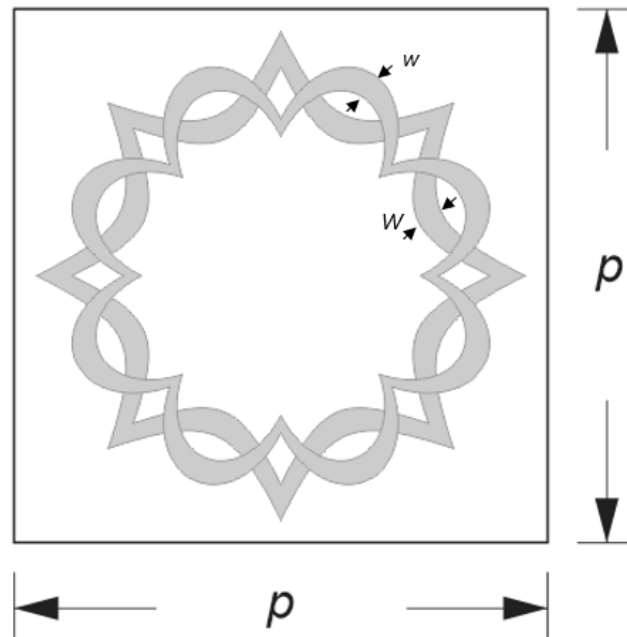


Figura 21: Célula unitária da FSS-5 com espiras polares cruzadas – côncava e convexa.

Tabela 1: Valores dos parâmetros geométricos dos protótipos de filtros espaciais FSS fabricados com elementos polares gerados a partir da superfórmula de Gielis.

Projeto	Parâmetros Geométricos									
	$m$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$a$	$b$	$r(\text{mm})$	$w(\text{mm})$	$W(\text{mm})$	$p(\text{mm})$
FSS-1 (espira maior)	8	1	1	1	1	1	15,5	-	1,5	32 x 32
FSS-1 (espira menor)	8	1	1	1	1	1	8,8	1,7	-	
FSS-2 (espira maior)	8	-1	1	1	1	1	12,3	-	0,7	25 x 25
FSS-2 (espira menor)	8	1	1	1	1	1	7,66	0,6	-	
FSS-3 (espira abertura)	8	-1	1	1	1	1	19,2	1,5	-	36,5 x 36,5
FSS-4 (espira maior)	8	-1	1	1	1	1	12,9	-	2	33 x 33
FSS-4 (espira menor)	8	1	1	1	1	1	7,3	2	-	
FSS-5 (espira maior)	8	1	1	1	1	1	20,4	-	3	45 x 45
FSS-5 (espira menor)	8	-1	1	1	1	1	18,4	2	-	



## 6 Resultados e Discussão

Neste Capítulo são apresentados os resultados simulados e medidos para os filtros espaciais FSS desenvolvidos nesta dissertação. São apresentados os estudos comparativos realizados em termos do coeficiente de transmissão obtidos para cada FSS abordada. Os resultados numéricos obtidos dos parâmetros frequência de ressonância e largura de banda, bem como, o efeito do ângulo de incidência da radiação eletromagnética nas respostas em frequência destas FSS são discutidos.

### 6.1 Resultados da superfície seletiva em frequência com espiras circular

Inicialmente, foi considerado o projeto de um filtro espacial FSS rejeita-faixas com duas espiras circulares de raios 15,2 mm para a espira maior e 9 mm para a menor e com espessura,  $w = 2$  mm, para cada espira. Neste caso, considerou-se um elemento (célula unitária) quadrado de periodicidade  $p = 33$  mm. As simulações foram realizadas considerando-se um substrato dielétrico de fibra de vidro (FR-4), com as seguintes especificações: espessura do substrato,  $h = 1,5$  mm, constante dielétrica,  $\epsilon_r = 4,4$  e tangente de perdas,  $\text{tg}(\delta) = 0,02$ .

Na Figura 22 é ilustrado o resultado simulado obtido para o coeficiente de transmissão na faixa de 1 - 7 GHz para a FSS projetada com duas espiras circulares. O limiar de -10 dB indicado na Figura 22 é considerado para o cálculo da largura de banda de cada faixa de rejeição da FSS. Os resultados obtidos indicaram que para cada espira circular corresponde uma faixa de rejeição e que quanto maior o raio da espira menor a frequência de ressonância observada. Com o auxílio do *software* ANSYS Designer™ o valor do raio de cada espira circular foi ajustado para sintonia das frequências de ressonância desejadas, isto é, 2,45 GHz e 5,5 GHz.

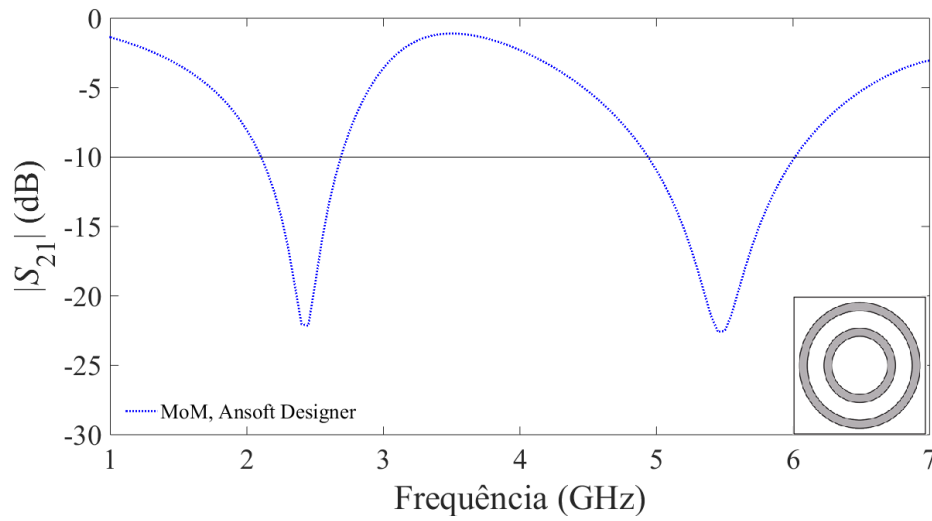


Figura 22: Resposta em frequência para a FSS com duas espiras circulares, resultado simulado  $|S_{21}|$  em dB.

Tabela 2: FSS com espiras circulares: valores numéricos obtidos.

FSS com espiras circulares	Parâmetros					
	$fr_1$	$BW_1$	$fr_2$	$BW_2$	$ S_{21} _1$	$ S_{21} _2$
	(MHz)				(dB)	
Simulado	2450	600	5500	1050	-22,14	-21,32

Uma análise paramétrica foi realizada para verificação do efeito da variação da espessura  $w$  das espiras circulares nas frequências de ressonância da FSS. A Figura 23 apresenta os resultados simulados obtidos levando-se em conta os valores de 2, 3, 4 e 5 mm para a espessura  $w$  de cada espira. Verificou-se através das simulações que as frequências ressonantes das duas bandas de rejeição aumentam com o aumento da espessura  $w$  das espiras.

Constatou-se que, para um aumento de 3 mm na espessura das espiras circulares  $w$  houve um aumento de 6,1% na primeira frequência de ressonância e um aumento de 11,81% na segunda frequência de ressonância. Com o aumento de 4 mm a primeira frequência de ressonância aumentou 14,28% e a segunda 20,9%. Constatou-se que, para um aumento de 5 mm na espessura das espiras circulares ( $w = 5$  mm) houve um aumento de 24,49% e 24,54% para a primeira e segunda frequência de ressonância, respectivamente. A Tabela 3 apresenta os valores numéricos obtidos para frequências de ressonância e larguras de banda em função da espessura  $w$  das espiras circulares.

Tabela 3: FSS com espiras circulares: valores numéricos obtidos em relação a espessura da espira.

Parâmetros				
$w$	$fr_1$	$fr_2$	$BW_1$	$BW_2$
(mm)	(MHz)			
2	2,450	5,500	600	1050
3	2,600	6,150	650	1350
4	2,800	6,650	700	1450
5	3,050	6,850	700	945

Em relação às larguras de banda, verificou-se que as larguras de banda são diretamente proporcionais à espessura das espiras até o valor de  $w = 4$  mm.

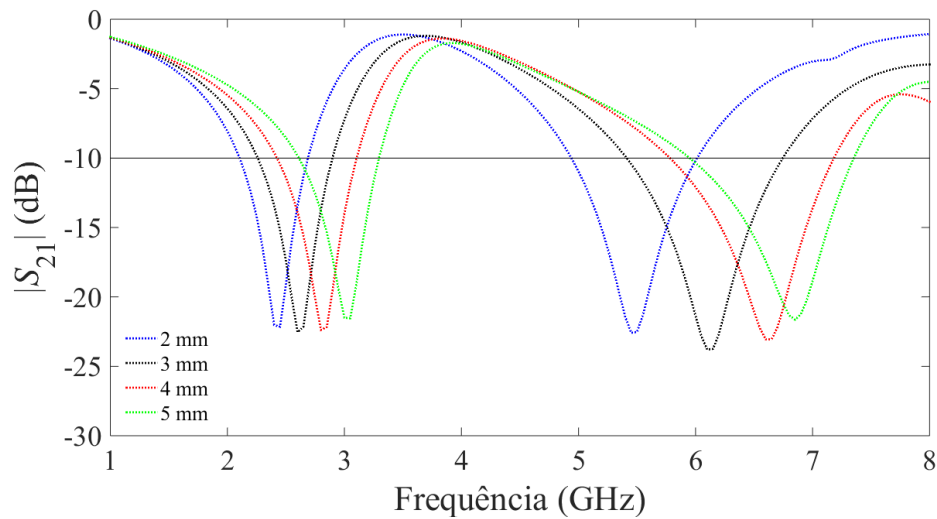


Figura 23: Variação das frequências de ressonância de uma FSS com duas espiras circulares em função da espessura das espiras.

## 6.2 Resultados para os filtros espaciais FSS com elementos polares

As superfícies seletivas em frequência com elementos polares abordadas foram propostas levando-se em conta dois tipos de substrato dielétrico: fibra de vidro (FR-4) e vidro. O substrato dielétrico de fibra de vidro (FR-4) considerado tem os seguintes parâmetros: espessura  $h = 1,5$  mm, permissividade relativa elétrica  $\epsilon_r = 4,4$  e tangente

de perdas  $\text{tg}(\delta) = 0,02$ . O substrato dielétrico de vidro considerado contém os parâmetros: espessura  $h = 2$  mm, permissividade relativa elétrica  $\epsilon_r = 6,1$  e tangente de perdas  $\text{tg}(\delta) = 0,083$ . As simulações dos protótipos foram realizadas com o uso do *software* ANSYS Designer™.

Os protótipos foram construídos pelo método convencional de fabricação de circuitos impressos com a utilização de percloroeto de ferro no processo de corrosão. Os resultados experimentais foram obtidos no Laboratório de Medidas em Telecomunicações do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), Campus João Pessoa. O arranjo de medição usado para obtenção dos resultados experimentais para os filtros propostos é composto por: analisador de redes vetorial, cabos e conectores, mesa de acrílico giratória com escala angular, suportes de acrílico e antenas do tipo corneta modelo SAS-571 (700 MHz - 18 GHz). O arranjo pode ser visualizado na configuração de medição da FSS-3 com *patch* convexo e abertura em forma de espira côncava na Figura 24.



Figura 24: Arranjo de medição para FSS-3 com *patch* convexo e abertura em forma de espira côncava.

### 6.2.1 FSS-1 com duas espiras polares côncavas

O primeiro projeto de FSS com duas espiras polares côncavas foi denominado de FSS-1. Após a realização da etapa de simulação, um protótipo da FSS-1 foi fabricado com um arranjo periódico de  $12 \times 12$  elementos, totalizando um número de 144 células unitárias, cada uma com  $32 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$ , o que corresponde uma dimensão total de  $384 \text{ mm} \times 384 \text{ mm}$  para o protótipo fabricado da FSS-1, Figura 25.

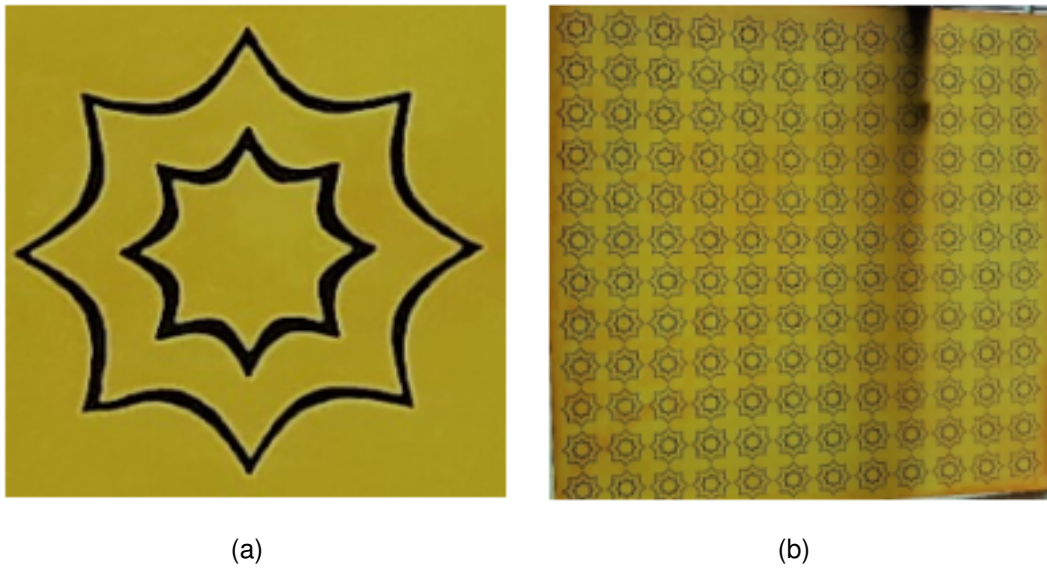


Figura 25: Protótipo da FSS-1 com duas espiras polares côncavas: (a) célula unitária; (b) FSS fabricada.

Na Figura 26 é apresentado um gráfico de comparação entre os resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão ( $|S_{21}|$ , em dB) para a FSS-1. Pode-se observar uma boa concordância entre os resultados obtidos com uma diferença percentual de 3,26% e 2,65% para a primeira e segunda frequência de ressonância, respectivamente.

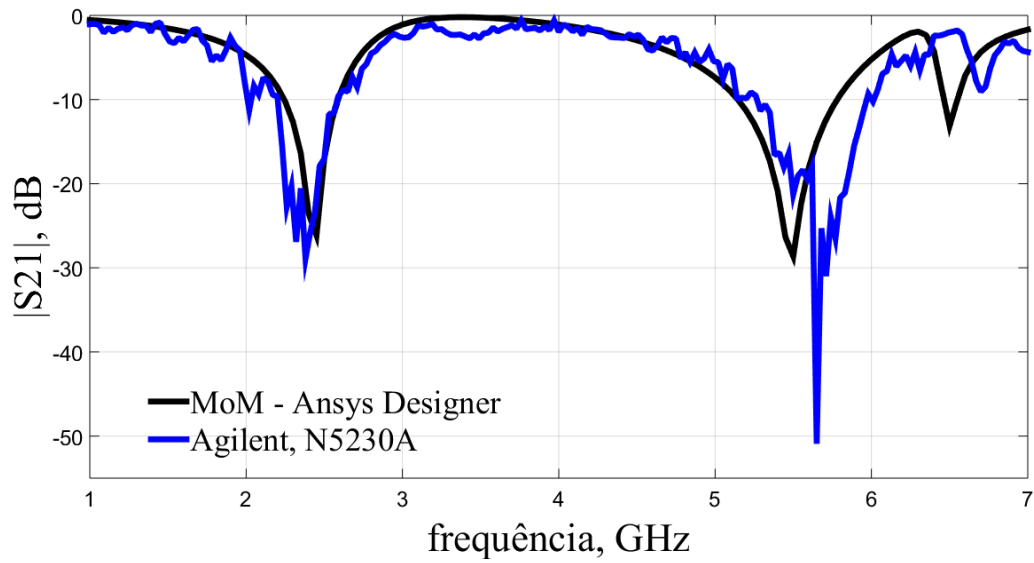


Figura 26: Comparação das respostas em frequência para FSS-1 com duas espiras polares côncavas, resultados simulado e medido,  $|S_{21}|$  em dB.

Foram realizadas medições para a FSS-1 proposta considerando-se ângulos de incidência da radiação eletromagnética de 0, 10, 30 e 50 graus. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 27. Observa-se que há uma boa estabilidade em frequência nas duas bandas de rejeição para ângulos de incidência de até 30 graus. Em comparação com os valores de frequência de ressonância obtidos para incidência normal (ver Tabela 4), para um ângulo de incidência de 50 graus ocorre um desvio máximo de 7,59% e 6,54% para a primeira e segunda frequência de ressonância, respectivamente. Os valores numéricos obtidos, simulados e medidos, são listados na Tabela 4.

Tabela 4: FSS-1 com duas espiras polares côncavas: comparação entre os valores numéricos obtidos.

FSS-1	Parâmetros					
	$fr_1$	$BW_1$	$fr_2$	$BW_2$	$ S_{21} _1$	$ S_{21} _2$
	(MHz)				(dB)	
Simulado	2450	350	5500	600	-26,13	-22,41
Medido	2379	506	5655	621	-28,89	-50,91
Diferença %	3,26	44,57	2,65	3,50	10,56	127,18



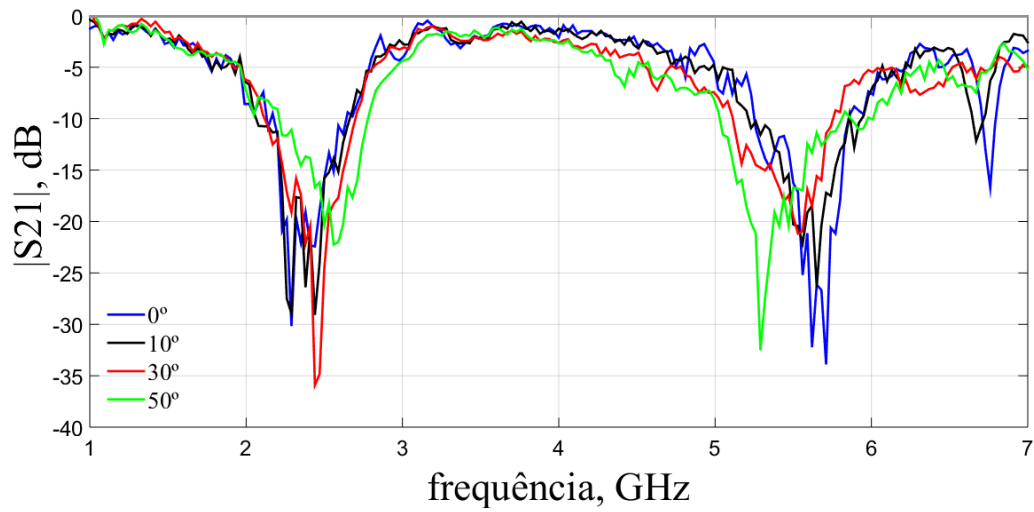


Figura 27: Resultados medidos para FSS-1 com duas espiras polares côncavas, em função do ângulo de incidência.

### 6.2.2 FSS-2 com duas espiras polares - côncava e convexa

O segundo projeto de FSS com duas espiras polares (côncava e convexa), foi denominado de FSS-2. Após a realização da etapa de simulação, um protótipo da FSS-2 foi fabricado com um arranjo periódico de  $16 \times 16$  elementos, totalizando um número de 256 células unitárias, cada uma com  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ , o que corresponde uma dimensão total de  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  para o protótipo fabricado, Figura 28.

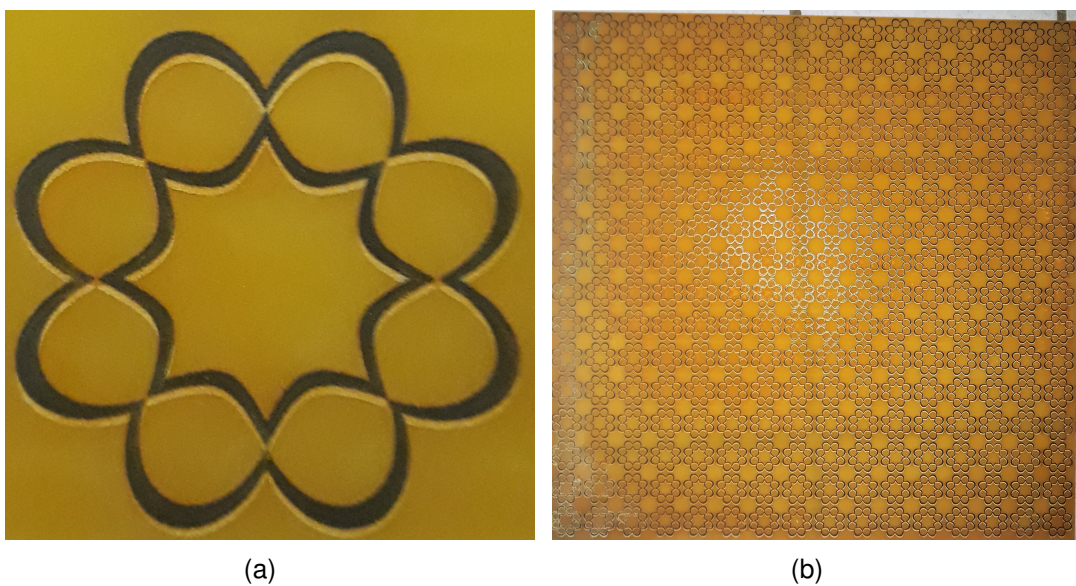


Figura 28: Protótipo da FSS-2 com duas espiras polares - côncava e convexa: (a) célula unitária; (b) FSS fabricada.

Uma comparação do coeficiente de transmissão simulado e medido na faixa de 1 – 7 GHz é apresentada na Figura 29. Pode-se observar uma excelente concordância entre os resultados medidos e simulados para a primeira banda de rejeição (2,45 GHz), com uma diferença de apenas 0,65%. Todavia, para a segunda banda de rejeição (5,5 GHz) verificou-se uma diferença de 8,1%.

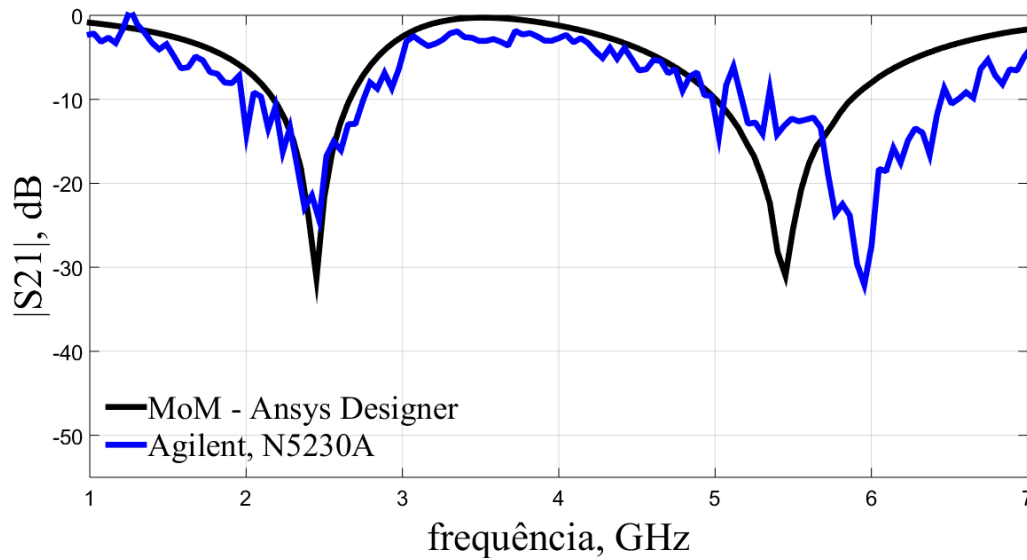


Figura 29: Comparação das respostas em frequência para FSS-2 com duas espiras polares - côncava e convexa, resultados simulado e medido,  $|S_{21}|$  em dB.

Avaliando-se o protótipo fabricado da FSS-2, observou-se a ocorrência de falhas na fabricação da espira polar de raio menor, isto é, foram identificados pontos de curto-circuito com a espira polar de raio maior, Figura 30. Provavelmente este foi um motivo da diferença entre os resultados simulados e medidos para a segunda banda de rejeição da FSS-2.

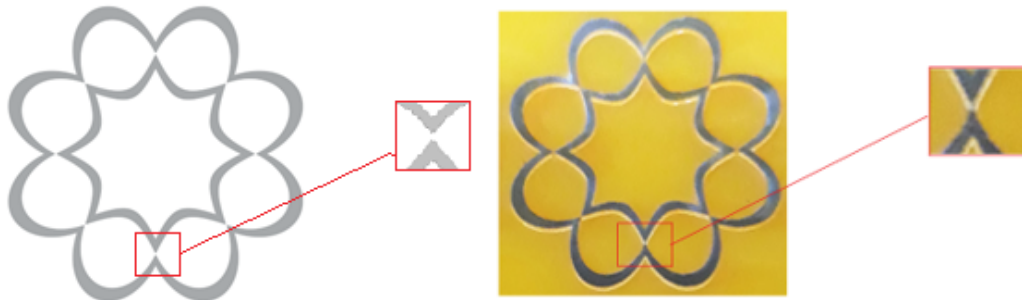


Figura 30: Comparação entre o elemento polar projetado e fabricado para FSS-2 com duas espiras polares - côncava e convexa.



Para a segunda FSS projetada com duas espiras polares (FSS-2) foram realizadas medições considerando a incidência oblíqua da radiação eletromagnética para os valores de 0, 10, 30 e 50 graus. Na Figura 31 são apresentados os resultados medidos obtidos. A primeira frequência de ressonância medida (2,46 GHz para incidência normal) até 50 graus, verificou-se uma boa estabilidade da resposta em frequência, com um desvio máximo de 5,69%. Enquanto que, na segunda frequência de ressonância medida (5,95 GHz para incidência normal) a variação máxima desta frequência ressonante acontece no ângulo de 30 graus, constatou-se um desvio máximo de 3,87% para menos. A comparação entre os valores numéricos dos parâmetros ressonantes medidos e simulados são dados na Tabela 5.

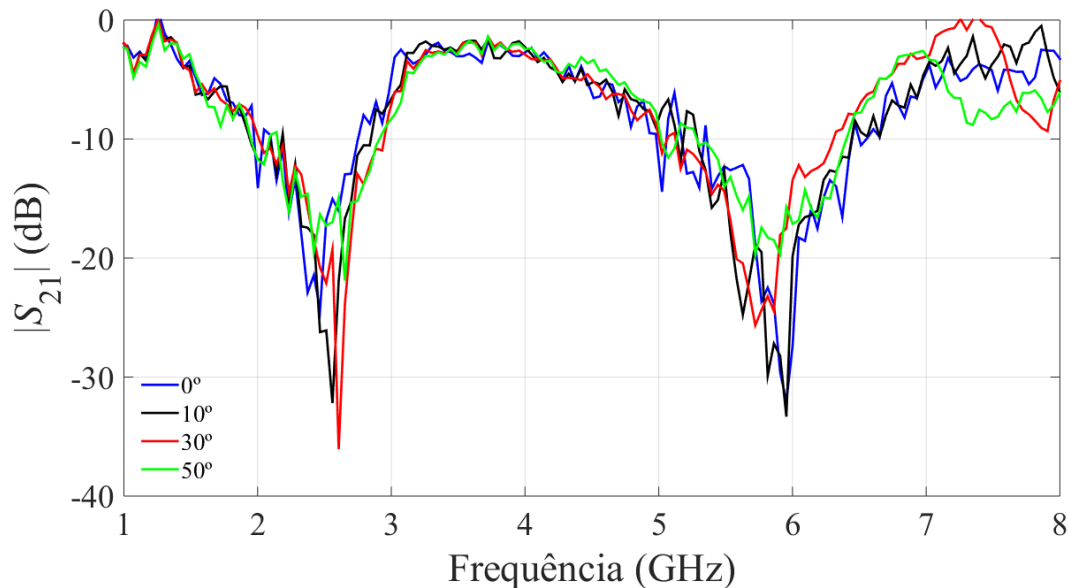


Figura 31: Resultados medidos para FSS-2 com duas espiras polares - côncava e convexa, em função do ângulo de incidência.

Tabela 5: FSS-2 com duas espiras polares - côncava e convexa: comparação entre os valores numéricos obtidos.

FSS-2	Parâmetros					
	$fr_1$	$BW_1$	$fr_2$	$BW_2$	$ S_{21} _1$	$ S_{21} _2$
	(MHz)				(dB)	
Simulado	2450	450	5500	850	-31,29	-30,97
Medido	2466	716	5950	1028	-24,27	-32,06
Diferença %	0,65	59,11	8,18	20,94	-22,43	3,52

### 6.2.3 FSS-3 com *patch* convexo e abertura em forma de espira cônica

O terceiro projeto de FSS com *patch* convexo e abertura em forma de espira cônica, foi chamado de FSS-3. Após a realização da etapa de simulação, um protótipo da FSS-3 foi fabricado com um arranjo periódico de  $10 \times 10$  elementos totalizando um número de 100 células unitárias, cada uma com  $36,5 \text{ mm} \times 36,5 \text{ mm}$ , o que corresponde uma dimensão total de  $365 \text{ mm} \times 365 \text{ mm}$  para o protótipo fabricado, Figura 32.

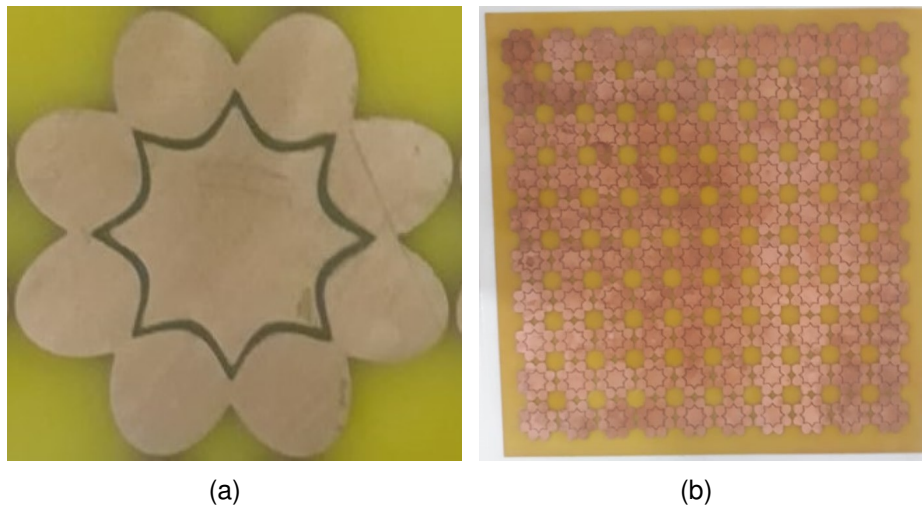


Figura 32: Protótipo da FSS-3 com *patch* convexo e abertura em forma de espira cônica: (a) célula unitária; (b) FSS fabricada.

Os resultados simulados e medidos são analisados de acordo com o parâmetro de espalhamento  $|S_{21}|$  (coeficiente de transmissão), considerando uma perda de inserção de -10 dB. Na Figura 33 é apresentado um comparativo entre os resultados simulado e medido do coeficiente de transmissão para a FSS-3 na faixa de frequências de 1 – 7 GHz.

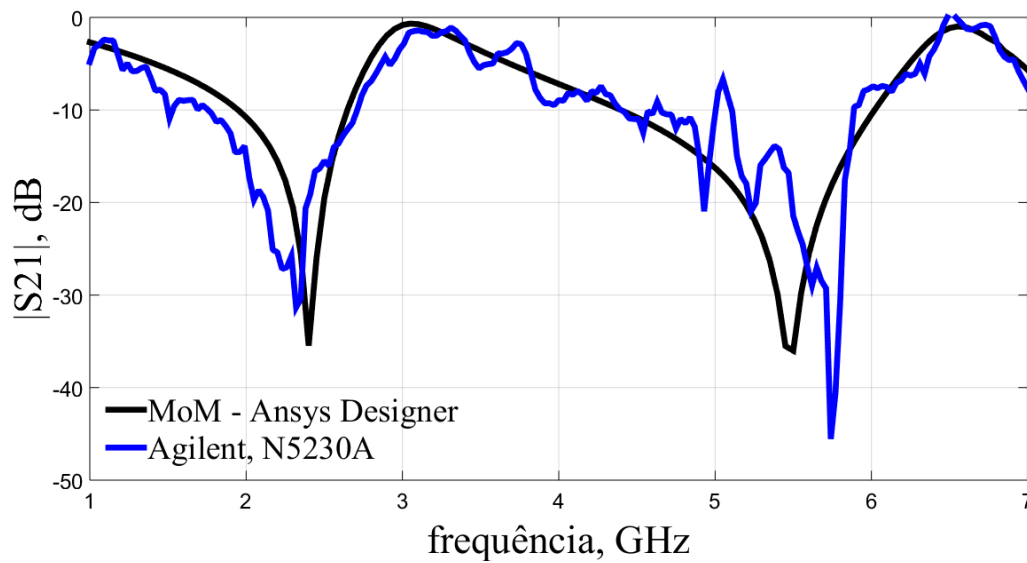


Figura 33: Comparação das respostas em frequência para FSS-3 com *patch* convexo e abertura em forma de espira côncava, resultados simulado e medido,  $|S_{21}|$  em dB.

Verifica-se que para a primeira banda de rejeição há uma redução na frequência de ressonância medida (2,31 GHz) de 3,75% quando comparada ao resultado simulado (2,4 GHz). Entretanto, na segunda banda de rejeição, a frequência de ressonância medida (5,74 GHz) aumenta 4,4% em relação à frequência de ressonância simulada (5,5 GHz).

Para o terceiro filtro espacial FSS projetado com duas espiras polares (FSS-3) foram realizadas medições considerando a incidência oblíqua da radiação eletromagnética para os valores de 0, 10, 30 e 50 graus. Na Figura 34 são apresentados os resultados medidos obtidos. A primeira frequência de ressonância medida (2,31 GHz para incidência normal) até 50 graus, verificou-se uma boa estabilidade da resposta em frequência, com um desvio máximo de 9,09%. Enquanto que, para a segunda banda de rejeição (5,74 GHz), o desvio máximo foi de 6,27%. Verifica-se que até 30 graus a resposta em frequência é estável em relação ao ângulo de incidência para as duas bandas de operação. A comparação dos valores numéricos dos parâmetros ressonantes medidos e simulados são apresentados na tabela 6.

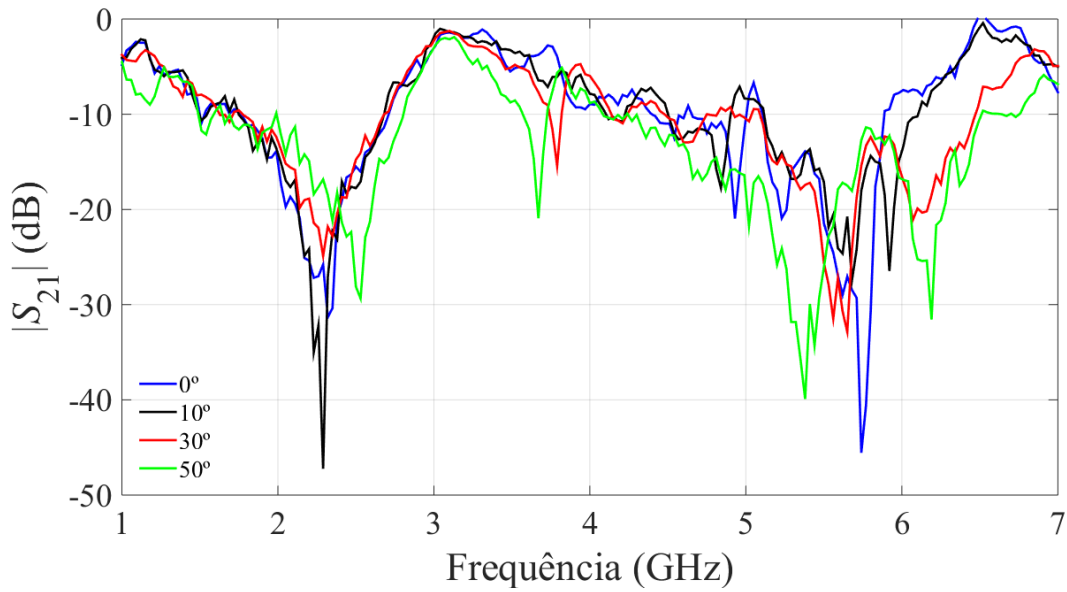


Figura 34: Resultados medidos para FSS-3 com *patch* convexo e abertura em forma de espira côncava, em função do ângulo de incidência.

Tabela 6: FSS-3 com *patch* convexo e abertura em forma de espira côncava: comparação entre os valores numéricos obtidos.

FSS-3	Parâmetros					
	$fr_1$	$BW_1$	$fr_2$	$BW_2$	$ S_{21} _1$	$ S_{21} _2$
	(MHz)				(dB)	
Simulado	2400	500	5500	1400	-35,42	-36,00
Medido	2310	930	5742	820	-31,33	-45,39
Diferença %	3,75	86,00	4,40	-41,42	-11,54	12,50

#### 6.2.4 FSS-4 com duas espiras polares - côncava e convexa

As superfícies seletivas em frequência projetadas com substrato de vidro foram desenvolvidas com o objetivo de aplicar os protótipos em ambientes de propagação *indoor*, funcionando como uma janela seletiva em frequência como proposto em [4]. Dessa forma, foi necessário realizar a caracterização experimental das propriedades do vidro, como a permissividade elétrica relativa e a tangente de perdas. O substrato dielétrico de vidro utilizado, com uma espessura  $h = 2$  mm foi caracterizado no Laboratório de Medidas em Telecomunicações do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), Campus João Pessoa, no VNA da Agilent Technologies modelo S5071C (300 kHz – 20 GHz). Os resultados obtidos a partir da caracterização experimental do substrato dielétrico

de vidro para a permissividade elétrica relativa pode ser visto na Figura 35 e para a tangente de perdas, na Figura 36.

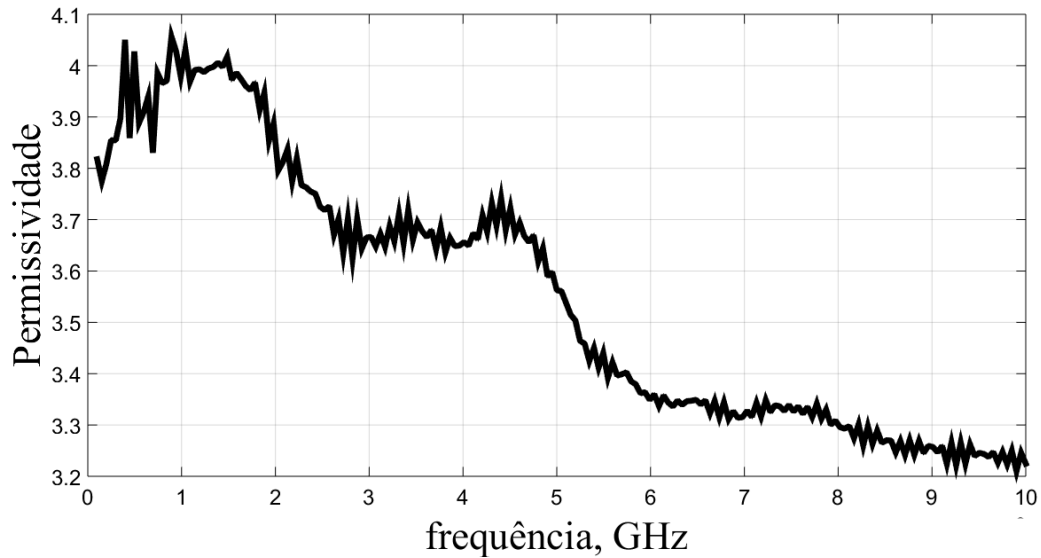


Figura 35: Permissividade elétrica relativa medida para o substrato de vidro.

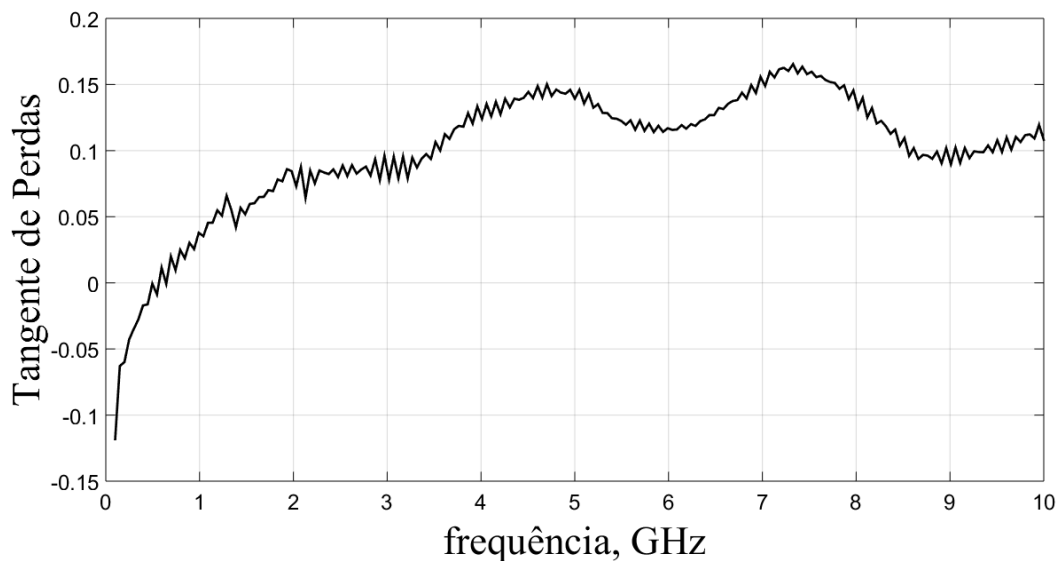


Figura 36: Tangente de perdas medida para o substrato de vidro.

É importante ressaltar que o protótipo da FSS-4 foi realizado inicialmente com o valor da permissividade elétrica relativa de  $\epsilon_r = 3,73$ . A escolha desse valor foi feita de forma empírica, visto que os valores obtidos para a permissividade elétrica relativa variam como mostrado na Figura 35. Observou-se uma resposta para a FSS-4 em duas bandas de rejeição na faixa de 1 - 7 GHz, como esperado. Entretanto, houve uma redução considerável nas frequências de ressonância medidas, levando a resposta

da FSS-4 (ver Figura 37) para fora da faixa de frequências desejada para rejeição de sinais WLAN (IEEE 802.11b e IEEE 802.11a). Dessa forma, a partir desses resultados foi possível verificar que o valor de permissividade elétrica relativa considerado para o vidro não correspondia ao valor real.

A partir dos resultados obtidos para o protótipo inicial da FSS-4, um método empírico de tentativa e erro foi usado, com auxílio do *software* ANSYS Designer™, para a determinação do valor correto para a permissividade elétrica relativa do substrato dielétrico de vidro. Desta forma, um segundo protótipo para a FSS-4 foi fabricado com os seguintes parâmetros considerados para o substrato dielétrico de vidro:  $h = 2$  mm,  $\epsilon_r = 6,1$  e  $\text{tg}(\delta) = 0,083$ . A Figura 37 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos de simulação e medição para o protótipo inicial da FSS-4. A curva de cor vermelha apresenta o resultado obtido do método empírico de tentativa e erro, que buscava identificar o valor da permissividade elétrica relativa do substrato de vidro utilizado. A Tabela 7 apresenta os valores numéricos para os parâmetros de frequência de ressonância e largura de banda para o protótipo inicial da FSS-4.

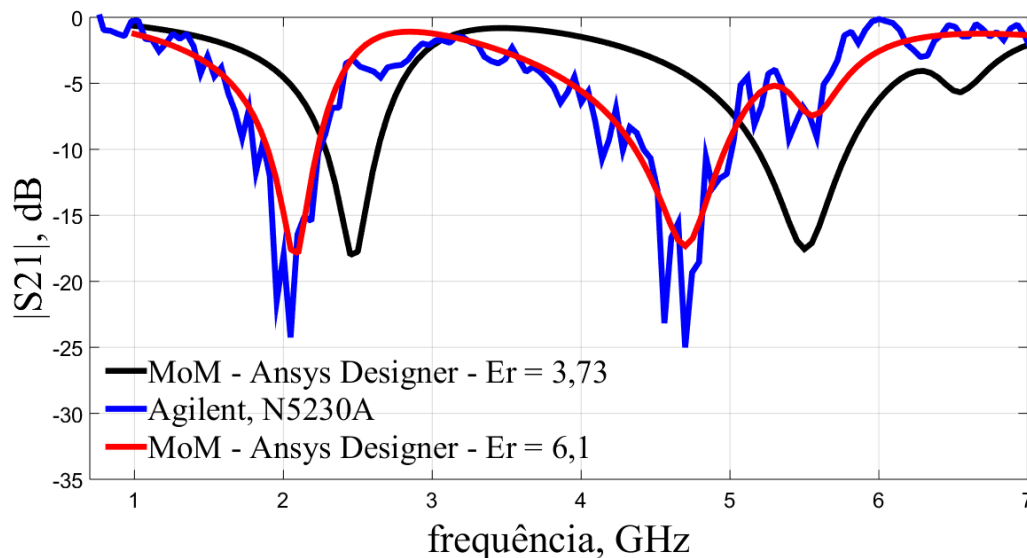


Figura 37: Comparação entre os resultados simulado e medido do protótipo inicial para FSS-4 com duas espiras polares - côncava e convexa.

Tabela 7: FSS-4 protótipo inicial com duas espiras polares - côncava e convexa: comparação entre os valores numéricos obtidos.

FSS-4 Protótipo inicial	Parâmetros					
	$fr_1$	$BW_1$	$fr_2$	$BW_2$	$ S_{21} _1$	$ S_{21} _2$
	(MHz)				(dB)	
Simulado	2450	500	5500	850	-18,00	-17,58
Medido	2050	372	4703	403	-24,28	-24,97
Diferença %	-16,33	-25,60	-14,50	-52,58	34,88	42,03

Na etapa de fabricação dos dois protótipos da FSS-4 foi utilizada uma fita adesiva de cobre, ilustrada na Figura 38, que é normalmente aplicada para blindagem acústica de instrumentos musicais de cordas. Após a aplicação da fita adesiva cobreada sobre um lado da superfície de vidro, o desenho do arranjo periódico é impresso sobre o cobre. Posteriormente, utiliza-se o percloroeto de ferro no processo de corrosão.

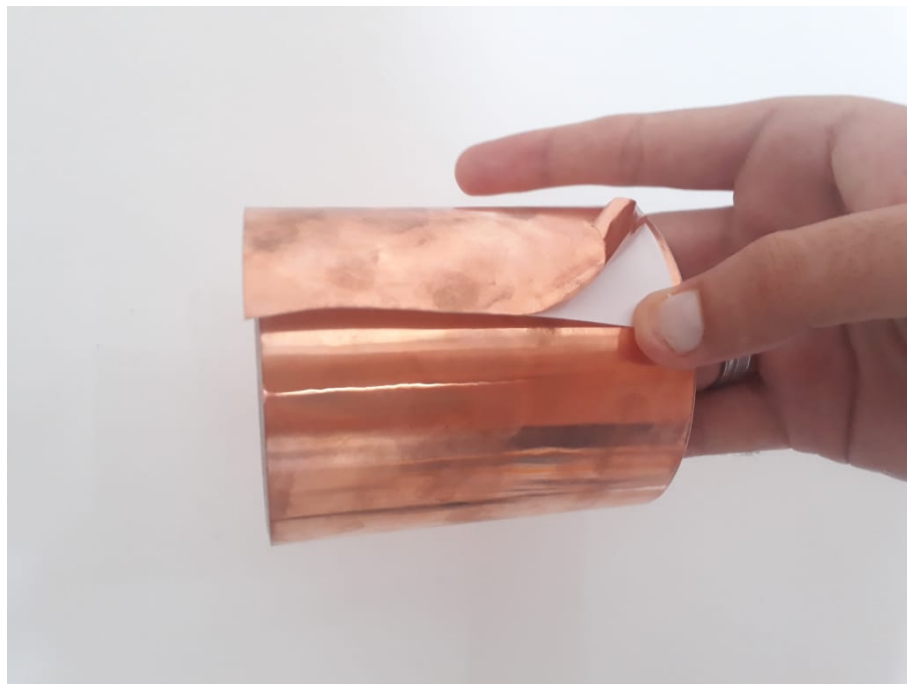


Figura 38: Laminado adesivo de cobre.

O protótipo da FSS-4 foi fabricado com um arranjo periódico de  $12 \times 12$  elementos totalizando um número de 144 células unitárias, cada uma com  $33 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$ , o que corresponde uma dimensão total de  $396 \text{ mm} \times 396 \text{ mm}$  para o protótipo fabricado, Figura 39. O projeto do elemento polar da FSS-4 foi desenvolvido considerando um par de espiras polares: uma côncava e uma convexa.

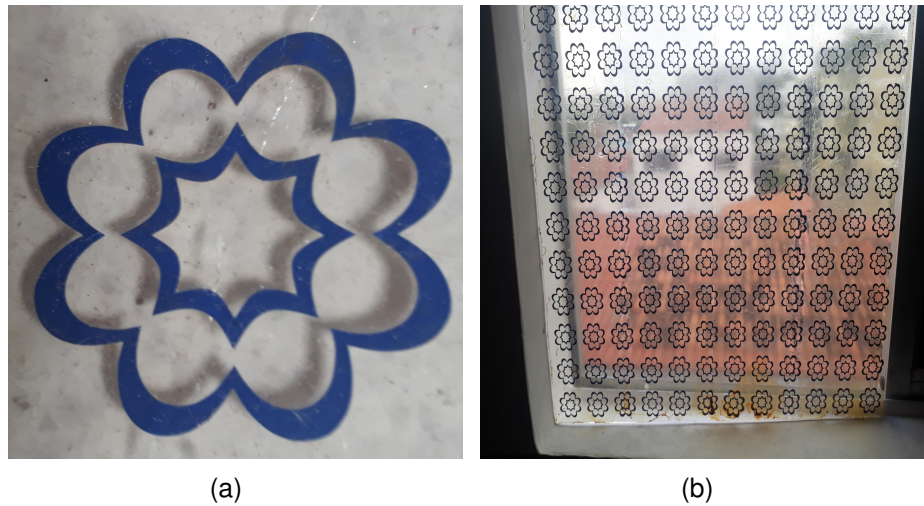


Figura 39: Protótipo da FSS-4 com duas espiras polares - côncava e convexa: (a) célula unitária; (b) FSS fabricada.

Na Figura 40 é apresentado um gráfico de comparação entre os resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão ( $|S_{21}|$ , em dB) para a FSS-4. Pode-se observar uma excelente concordância entre os resultados obtidos com uma diferença percentual de 0,24% para a primeira banda de rejeição e 0,27% para a segunda banda de rejeição. A largura de banda obtida para a primeira banda de rejeição foi de 485 MHz, cobrindo toda a faixa de operação dos sistemas WLAN (IEEE 802.11b). Na segunda banda de rejeição (IEEE 802.11a) a largura de banda foi de 400 MHz.

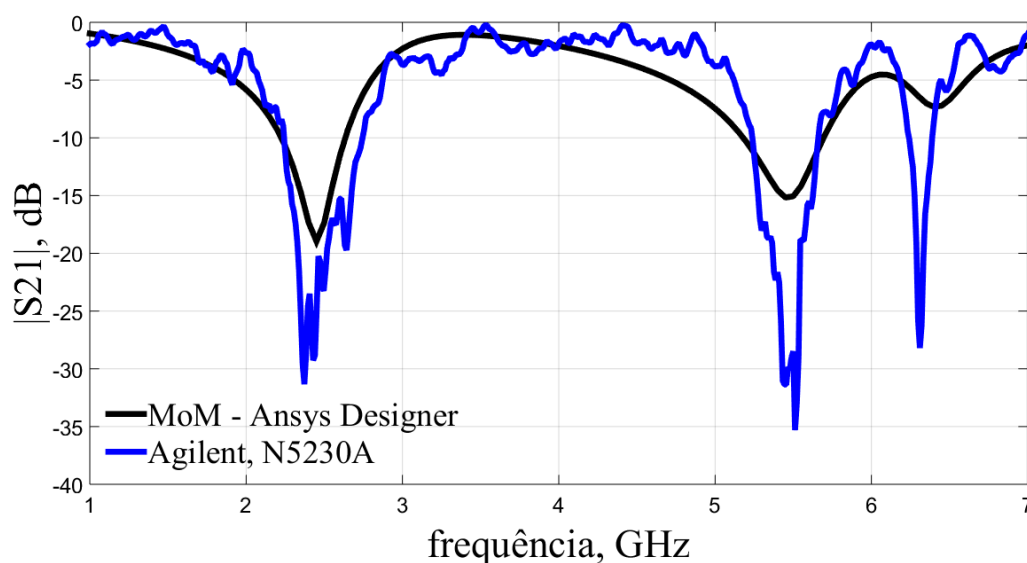


Figura 40: Comparação das respostas em frequência para FSS-4 com duas espiras polares - côncava e convexa, resultados simulado e medido,  $|S_{21}|$  em dB.



Visando analisar a estabilidade da resposta em frequência do protótipo da FSS-4, foram realizadas quatro medições do coeficiente de transmissão na faixa de 1-7 GHz, considerando-se a variação do ângulo de incidência da radiação eletromagnética a partir da incidência normal até 50 graus. A Figura 41 apresenta os resultados medidos do coeficiente de transmissão para FSS-4 em função do ângulo de incidência da radiação eletromagnética para valores de 0, 10, 30 e 50 graus.

A partir dos resultados medidos verifica-se que: para a primeira frequência de ressonância (2,45 GHz) existe uma boa estabilidade na frequência de ressonância, com um desvio máximo de 10,6% para o ângulo de 50 graus. Para a segunda frequência de ressonância (5,5 GHz), verifica-se que: até 10 graus a estabilidade é mantida e o desvio máximo verificado foi de 9,09% para um ângulo de 30 graus; para 50 graus, a frequência de ressonância e a largura de banda voltam a crescer. Os valores numéricos medidos e simulados para incidência normal são dados na Tabela 8.

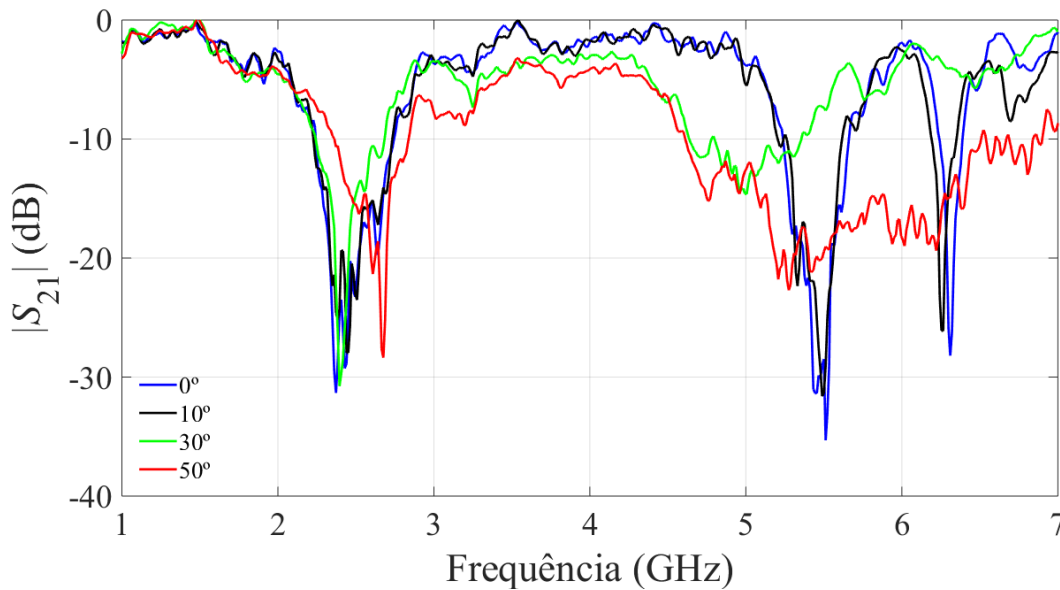


Figura 41: Resultados medidos para FSS-4 com duas espiras polares - côncava e convexa, em função do ângulo de incidência.

Tabela 8: FSS-4 com duas espiras polares - côncava e convexa: comparação entre os valores numéricos obtidos.

FSS-4	Parâmetros					
	$fr_1$	$BW_1$	$fr_2$	$BW_2$	$ S_{21} _1$	$ S_{21} _2$
	(MHz)				(dB)	
Simulado	2450	450	5500	550	-18,95	-14,07
Medido	2456	485	5515	400	-32,92	-35,15
Diferença %	0,24	7,77	0,27	-27,27	73,72	149,82

#### 6.2.5 FSS-5 com espiras polares cruzadas – côncava e convexa

O projeto inicial do elemento polar da FSS-5 foi desenvolvido para um substrato dielétrico de fibra de vidro (FR-4) considerando um par de espiras polares, cada uma desenhada com a combinação de duas espiras cruzadas: uma côncava e uma convexa. A célula unitária simulada no ANSYS Designer™ para ressonar nas duas bandas de operação de sistemas WLAN *indoor* (IEEE 802.11b e IEEE802.11a) é apresentada na Figura 42.



Figura 42: Célula unitária do protótipo inicial da FSS-5.

Devido as dificuldades encontradas para a fabricação do elemento ilustrado na Figura 42, optou-se pela fabricação em substrato dielétrico de vidro apenas da espira de raio maior, para operação na faixa de frequências WLAN em 2,45 GHz. A Figura

43 apresenta o resultado simulado obtido para o coeficiente de transmissão do projeto inicial da FSS-5.

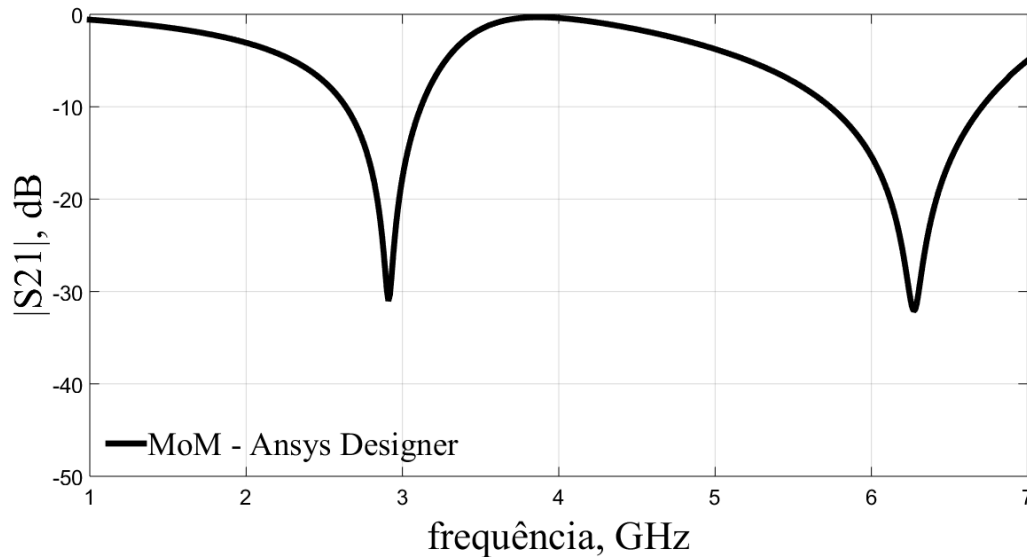


Figura 43: Resposta em frequência do protótipo inicial para FSS-5, resultado simulado,  $|S_{21}|$  em dB.

A FSS-5 apresenta um número total de 64 células,  $8 \times 8$  elementos, cada célula unitária com  $45 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ , o que corresponde a uma dimensão total de  $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ , o protótipo pode ser visualizado na Figura 44. Foi considerado um substrato de vidro com  $h = 2 \text{ mm}$ ,  $\epsilon_r = 6,1$  e  $\text{tg}(\delta) = 0,083$ . A fabricação do protótipo da FSS-5 foi realizada pelo mesmo método da FSS-4, isto é, utilizando um adesivo laminado de cobre com a utilização de percloroeto de ferro no processo de corrosão.

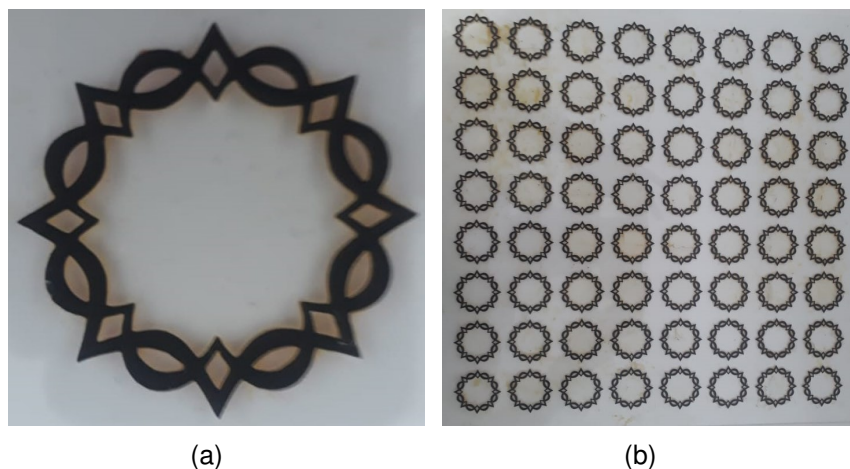


Figura 44: Protótipo da FSS-5 com espiras polares cruzadas – côncava e convexa: (a) célula unitária; (b) FSS fabricada.

Na Figura 45 é apresentado o arranjo de medição usado para obtenção dos resultados experimentais para a FSS-5, que consiste principalmente de: analisador de redes vetorial, cabos e conectores, mesa de acrílico giratória com escala angular, suportes de acrílico e antenas do tipo corneta modelo SAS-571 ( 700 MHz - 18 GHz). Com o intuito de aplicar esse protótipo em ambientes *indoor*, atuando como uma janela seletiva em frequência, o nível de transparência do vidro também foi considerado no momento da execução do projeto. A FSS-5 contém espiras finas e um espaço interno de maior visibilidade na célula unitária.



(a)

Figura 45: Arranjo para medição da FSS-5 com espiras polares cruzadas – côncava e convexa.

Na Figura 46 pode-se observar um comparativo entre os coeficientes de transmissão simulado e medido para o protótipo da FSS-5 construída. Os resultados experimentais estão em excelente concordância com as simulações do ANSYS Designer™. A frequência de ressonância medida (2,44 GHz) apresentou um deslocamento de 0,4% quando comparada com a frequência de ressonância simulada (2,45 GHz). A largura de banda medida foi de 672 MHz, cobrindo toda a faixa de operação dos sistemas WLAN (IEEE 802.11b).

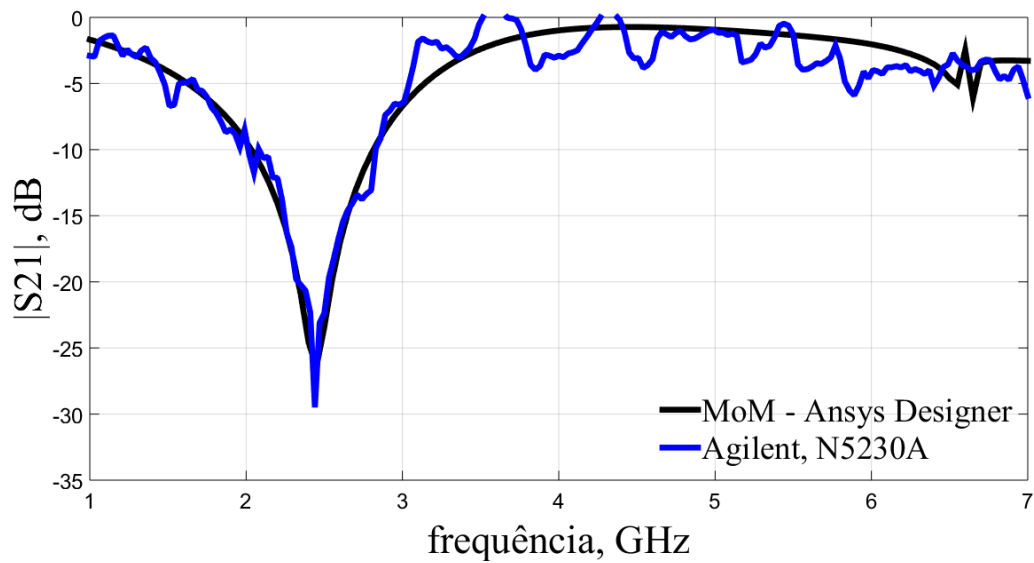


Figura 46: Comparação das respostas em frequência para FSS-5 com espiras polares cruzadas – côncava e convexa, resultados simulado e medido,  $|S_{21}|$  em dB.

A fim de verificar a estabilidade em frequência do protótipo, foram realizadas medições considerando a incidência oblíqua da radiação eletromagnética para os valores de 0, 10, 30 e 50 graus. Observando a Figura 47 verifica-se que a resposta em frequência é estável em relação ao ângulo de incidência. O desvio máximo na frequência de ressonância foi de 1,18%. Analisando a diferença percentual da frequência de ressonância a cada ângulo medido, confirma-se a excelente estabilidade em frequência. Por exemplo, a diferença percentual da frequência na incidência normal até 10 graus foi de 0,4%. O desvio máximo acontece no ângulo de 30 graus (1,18%) como citado anteriormente, contudo muito baixo para o projeto. Por fim, a diferença percentual no ângulo de 50 graus é de 0,08%. A comparação dos valores numéricos dos parâmetros ressonantes medidos e simulados são apresentados na tabela 9.

Tabela 9: FSS-5 com espiras polares cruzadas – côncava e convexa: comparação entre os valores numéricos obtidos.

FSS-5	Parâmetros		
	$f_{r1}$	$BW_1$	$ S_{21} $
	(MHz)	(dB)	(dB)
Simulado	2450	750	-26,42
Medido	2440	672	-29,49
Diferença %	-0,41	-10,40	11,62

Em relação as larguras de banda verificou-se que até a variação angular de 30 graus houve um aumento na largura de banda. Por exemplo, em 10 graus a largura de banda aumentou 22,32%. No ângulo de 30 graus o aumento foi de 16,6% em relação a largura de banda da incidência normal. Na última angulação medida, ou seja 50 graus, a largura de banda foi semelhante a largura de banda da incidência inicial.

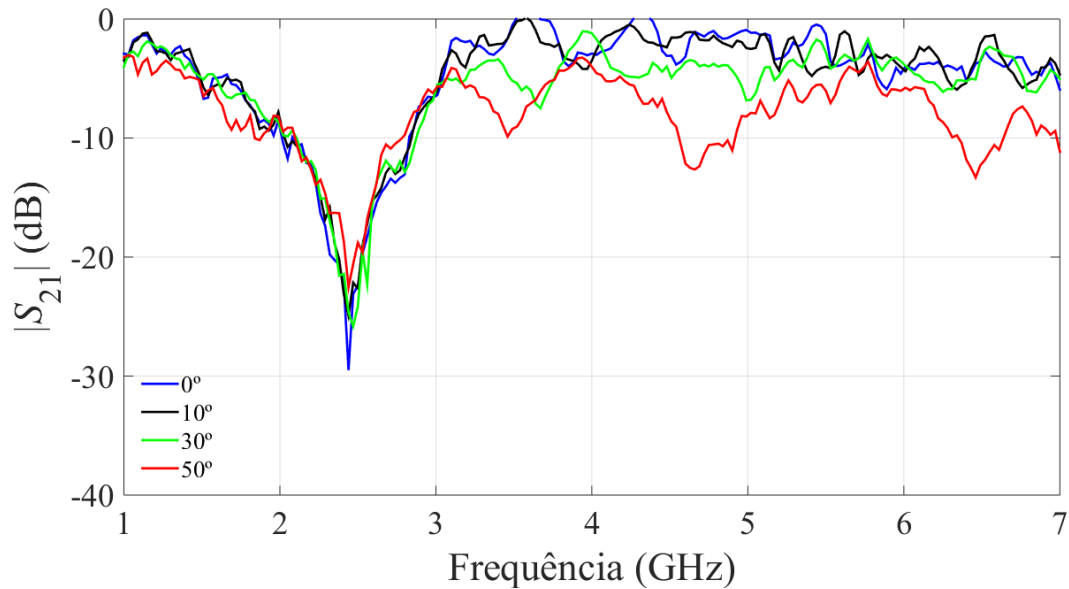


Figura 47: Resultados medidos para FSS-5 com espiras polares cruzadas – côncava e convexa, em função do ângulo de incidência.

## 7 Considerações Finais

Nesta dissertação foi realizado um estudo das propriedades ressonantes de filtros espaciais FSS do tipo rejeita-faixas com elementos polares para aplicações *indoor* de redes locais sem fio. A análise das FSS abordadas foi feita em termos de resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão, a partir dos quais, os parâmetros frequência de ressonância e largura de banda foram obtidos. A estabilidade destes parâmetros em função do ângulo de incidência da radiação eletromagnética foi verificada. Os filtros espaciais FSS foram projetados para operação em uma ou duas bandas, considerando-se as faixas de frequências de operação para as redes locais sem fio, em 2,4 GHz e 5,8 GHz. Nos projetos dos filtros espaciais FSS foram considerados o uso de dois tipos de substratos dielétricos: fibra de vidro (FR-4) e vidro. Destaca-se neste trabalho a metodologia empregada para a geração/simulação de elementos polares. Através desse método é possível gerar diversos tipos de elementos e importá-los no *software* de simulação.

Os protótipos fabricados com substrato fibra de vidro FR-4, apresentaram bons resultados. Em especial as FSS-1 com duas espiras polares côncavas e FSS-3 com *patch* convexo e abertura em forma de espira côncava. Estes dois filtros demonstraram propriedades de rejeição nas duas bandas de operação 2,4 GHz (IEEE 802.11b) e 5,8 GHz (IEEE 802.11a), como também boa estabilidade em frequência. No entanto, a FSS-2 com duas espiras polares - côncava e convexa apresentou problemas na estrutura dos elementos, isto é, pontos de curto-circuito foram identificados entre as espiras de raio menor e raio maior. Dessa forma, provavelmente influenciando nos parâmetros eletromagnéticos. Contudo, o resultado da FSS-2 com duas espiras polares - côncava e convexa para a primeira banda de rejeição (2,45 GHz) foi excelente. A diferença percentual entre o resultado simulado e medido para a resposta em frequência de ressonância foi de 0,65%.

As superfícies seletivas em frequência com substrato vidro projetadas para comportarem-se como filtros rejeita-faixas de sinais WLAN, apresentaram excelentes propriedades de rejeição nas bandas de operação. A diferença percentual entre os resultados simulado e medido para as respostas em frequência de ressonância dos protótipos foi no máximo 0,4%. A FSS-5 com espiras polares cruzadas – côncava e con-

vexa apresentou excelente estabilidade em frequência, o desvio máximo na frequência de ressonância foi de 1,18%. Modificando um ambiente interno através da aplicação desses filtros na janela, pode-se obter o isolamento do local, uma vez que filtram sinais nas bandas de 2,4 GHz (IEEE 802.11b) e 5,8 GHz (IEEE 802.11a). Permitindo que ambas as redes possam operar separadamente sem quaisquer interferências.

## **7.1 Proposta para trabalhos futuros**

Propõem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Estudar outros tipos de transformações para gerar elementos de FSS, além de transformações polares;
- Utilizar substrato de papel de parede;
- Estudar possibilidades de direcionamento da pesquisa para contextos específicos como por exemplo: segurança de instituições públicas e privadas.



## Referências

- [1] Ohrtman, F., Roeder, K., “Wi-fi handbook: Building 802.11b wireless networks”, *McGraw-Hill*, 2003.
- [2] Nóbrega, Clarissa de Lucena, “Análise e projeto de superfícies seletivas de frequência com elementos pré-fractais para aplicações em comunicações indoor”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte: Tese (Doutorado), 2013.
- [3] G. H. H. Sung et al., “Modeling a low-cost frequency selective wall for wireless-friendly indoor environments”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, nº 1, pp. 311–314, 2006.
- [4] M. Gustafsson, A. Karlsson, A. P. P. Rebelo e B. Widenberg, “Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communication”, *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 54, nº 6, pp. 1897–1900, 2006.
- [5] M. Raspopoulos e S. Stavrou, “Frequency selective buildings through frequency selective surfaces”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, nº 8, pp. 2998–3005, 2011.
- [6] G. I. Kiani, L. G. Olsson, A. Karlsson, K. P. Esselle e M. Nilsson, “Cross-dipole bandpass frequency selective surface for energy-saving glass used in buildings”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, nº 2, pp. 520–525, 2011.
- [7] Oliveira, Maciel Alves de, “Projeto de antenas e superfícies seletivas de frequência a partir de transformações polares”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba: Dissertação (Mestrado), 2017.
- [8] W. Kiermeier e E. Biebl, “New dual-band frequency selective surfaces for gsm frequency shielding”, em *Microwave Conference, 2007. European*, IEEE, 2007, pp. 222–225.
- [9] J. C. Batchelor, E. A. Parker, B. Sanz-Izquierdo, J.-B. Robertson, I. Ekpo e A. Williamson, “Designing fss for wireless propagation control within buildings”, em *Antennas & Propagation Conference, 2009. LAPC 2009. Loughborough*, IEEE, 2009, pp. 14–17.

- [10] H. L. Bertoni, *Radio propagation for modern wireless systems*. Pearson Education, 1999.
- [11] D. Moltdar, "Review on radio propagation into and within buildings", em *IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*, IET, vol. 138, 1991, pp. 61–73.
- [12] C. Tsakonas, C. Mias e C. Oswald, "An investigation into feasibility of designing frequency-selective windows employing periodic structures, final report for the radiocommunications agency", 2006.
- [13] M. Philippakis, C. Martel, D. Kemp, R. Allan, M. Clift, S. Massey, S. Appleton, W. Damerell, C. Burton e E. Parker, "Application of fss structures to selectively control the propagation of signals into and out of buildings", *Ofcom ref. AY4464A*, 2004.
- [14] B. Widenberg e J. V. R. Rodriguez, "Design of energy saving windows with high transmission at 900 mhz and 1800 mhz", *Electromagnetic Theory Lund Institute of Technology*, 2002.
- [15] G. H.-h. Sung, K. W. Sowerby, M. J. Neve e A. G. Williamson, "A frequency-selective wall for interference reduction in wireless indoor environments", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 48, nº 5, 2006.
- [16] D. Kim, J. Yeo e J. Choi, "Compact spatial triple-band-stop filter for cellular/pcs/imt-2000 systems", *ETRI journal*, vol. 30, nº 5, pp. 735–737, 2008.
- [17] M. Abdin, U. Rafique, F. Malik, S. Qasim, M. A. Khan e M. M. Ahmed, "A novel dual-band frequency selective surface absorber", *International Journal of Electromagnetics and Applications*, vol. 2, nº 6, pp. 182–185, 2012.
- [18] F. Bagci, C. Mulazimoglu, S. Can, E. Karakaya, A. E. Yilmaz e B. Akaoglu, "A glass based dual band frequency selective surface for protecting systems against wlan signals", *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 82, pp. 426–434, 2017.
- [19] D. Kemp, C. Martel, M. Philippakis, M. Shelley, R. Pearson e I. Llewellyn, "Enhancing radio coverage inside buildings", em *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, IEEE, vol. 1, 2005, pp. 783–786.

- [20] J. C. Vardaxoglou, *Frequency selective surfaces: analysis and design*. Research Studies Press London, 1997, vol. 997.
- [21] T.-K. Wu, *Frequency selective surface and grid array*. Wiley-Interscience, 1995, vol. 40.
- [22] B. A. Munk, *Frequency selective surfaces: theory and design*. John Wiley & Sons, 2005.
- [23] Lins, Hertz Wilton de Castro, “Análise e síntese de antenas e superfícies seletivas de frequência utilizando computação evolucionária e inteligência de enxames”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte:Tese (Doutorado), 2012.
- [24] S. Narayan, K. Prasad, R. Nair e R. Jha, “A novel em analysis of cascaded thick fss using mode-matching generalized scattering matrix technique”, em *Applied Electromagnetics Conference (AEMC), 2011 IEEE*, IEEE, 2011, pp. 1–4.
- [25] M. A. Rodriguez Barrera, “Modelo de permissividade efetiva do dielétrico para o método do circuito equivalente em superfícies seletivas em frequência do tipo loop quadrado”, 213f. Tese (Doutorado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- [26] Costa, Iradilson Ferreira da, “Antenas e superfícies seletivas de frequência reconfiguráveis para sistemas de comunicação sem fio”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte: Dissertação (Mestrado), 2009.
- [27] Segundo, Francisco Carlos Gurgel da Silva, “Análise e projeto de superfícies seletivas em frequência multibanda e/ou banda larga”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.
- [28] A. P. Rebelo, “Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communication”, *Master of Science Thesis, Lund University*, 2004.
- [29] J. Huang, T.-K. Wu e S.-W. Lee, “Tri-band frequency selective surface with circular ring elements”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, nº 2, pp. 166–175, 1994.

- [30] C.-C. Chen, "Transmission through a conducting screen perforated periodically with apertures", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 18, nº 9, pp. 627–632, 1970.
- [31] D. S. Weile e E. Michielssen, "Analysis of frequency selective surfaces through the blazing onset using rational krylov model-order reduction and woodbury singularity extraction", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, nº 10, pp. 1470–1478, 2001.
- [32] M. W. B. d. Silva et al., "Superfícies seletivas em frequência-fss: Concepção e projeto de absorvedores planares de micro-ondas para aplicação em wlan, wimax e radar", 2014.
- [33] J. D'Angelo e I. Mayergoyz, "Three dimensional rf scattering by the finite element method", *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 27, nº 5, pp. 3827–3832, 1991.
- [34] M. Hara, T. Wada, T. Fukasawa e F. Kikuchi, "A three dimensional analysis of rf electromagnetic fields by the finite element method", *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 19, nº 6, pp. 2417–2420, 1983.
- [35] T. F. Eibert, Y. E. Erdemli e J. L. Volakis, "Hybrid finite element-fast spectral domain multilayer boundary integral modeling of doubly periodic structures", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, nº 9, pp. 2517–2520, 2003.
- [36] Pinheiro, Bruno de Melo, "Projeto de antenas multifuncionais integradas com superfícies seletivas em frequência", Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, 2016.
- [37] A. N. Silva, "Caracterização de fss com geometria em formato de u", Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba: Dissertação (Mestrado), Brasil, 2014.
- [38] A. Vena, E. Perret e S. Tedjini, "Novel compact rfid chipless tag", *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS'11)*, pp. 1062–1066, 2011.
- [39] A. V. e. S. T. V. Deepu, "New rf identification technology for secure applications", *IEEE International Conference on RFID-Technology and Applications*, 2010.

- [40] A. P. Cattai. (2006). Coordenadas polares. transformações entre coordenadas polares e coordenadas cartesianas, endereço: [http://www.alunospgmat.ufba.br/adrianocattai/ensino\\_arquivos/mat042--2006%202/coord\\_polares.pdf](http://www.alunospgmat.ufba.br/adrianocattai/ensino_arquivos/mat042--2006%202/coord_polares.pdf).
- [41] G. B. Thomas et al., *Cálculo, volume 2, 10a edição*, 2002.
- [42] E. W. Weisstein. (2018). Rose, endereço: <http://mathworld.wolfram.com/Rose.html>.
- [43] J. Gielis, “A generic geometric transformation that unifies a wide range of natural and abstract shapes”, *American journal of botany*, vol. 90, nº 3, pp. 333–338, 2003.
- [44] G. Lamé, “Examen de diferentes méthodes fonctionnaires despeje résoudre les problèmes de geometria”, *MV Courcier imprimeur Libraire*, 2008.